ナトリウム落下液滴の燃焼挙動*
(燃焼速度定数と抵抗係数)牧 野 敦^{*1}, 深 田 博 一^{*2}Combustion Behavior of a Falling Sodium Droplet
(Burning Rate-Constant and Drag Coefficient)Atsushi MAKINO^{*3} and Hirokazu FUKADA^{*3} Japan Aerospace Exploration Agency, 7-44-1 Jindaiji-Higashi, Chofu-shi, Tokyo 182-8522

Combustion behavior of a single sodium droplet has been studied experimentally, by use of a falling droplet. It is found that D^2 -law can hold for the sodium droplet combustion after the ignition, which can be observed to occur through an increase in the droplet temperature under the condition without a gaseous flame, suggesting that a surface reaction plays an important role in the ignition of sodium. It is also found that the burning rate-constant without forced convection has nearly the same value as those for conventional hydrocarbon droplets, although it is considered that the sodium combustion proceeds in an oxidizer-rich environment even in the air, which can be judged by comparing a temporal variation of the flame/droplet diameter ratio for the sodium droplet with that for the hydrocarbon droplet. A micro-explosion of the burning droplet is also observed when the oxygen concentration in the ambience exceeds 0.3 in mole fraction. As for the falling velocity and/or distance of the burning droplet, it has turned out that the use of the drag coefficient for solid sphere under isothermal condition is insufficient in obtaining their accurate values. It is found from another experiment that when $Re > 500$, the drag coefficient of the falling droplet undergoing combustion is as high as 2 depending on combustion situation and/or droplet temperature, while that of the solid sphere under isothermal condition is 0.44.

Key Words: Combustion, Combustion Phenomena, Diffusion Combustion, Sodium Droplet, D^2 -law, Burning Rate-Constant, Flame, Ignition, Falling Velocity, Drag Coefficient

1. 緒 論

優れた熱伝導性媒体であるナトリウムは、原子力施設、特に高速増殖炉(FBR: Fast Breeder Reactor)で用いられている。これは熱伝導性が良好なうえ、中性子をほとんど吸収せず、しかも冷却材使用温度が沸点(1155 K)よりも十分低く、原子炉冷却系統を低圧・高温の条件で設計できるためである。

しかしながら、ナトリウム利用技術の未熟さゆえに、世界各国でナトリウム事故が発生し、高速増殖炉の開発は見直しを余儀なくされている。日本でも「もんじゅ」の火災事故以来、高速増殖炉は運転を停止したままである。火災の危険性が内在するナトリウムについては、これを実用に供するため1960年代から燃焼や火災に関する研究が行われてきており、研究成果は総説論文^{(1)~(3)}に記載されている。基礎的な研究としては、単一液滴燃焼⁽⁴⁾⁽⁵⁾やプール燃焼⁽⁶⁾に関するものがある。また、「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故を

契機に、国内でも安全対策を重視した火災・消火実験や大規模な漏えい燃焼実験、さらには燃焼現象を解析するナトリウム燃焼コードの確立などが行われるようになってきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。このように、ナトリウム漏えい時に想定される種々の燃焼形態については、ここ数年、活発に研究がなされてきたが、ナトリウムの燃焼挙動の把握、燃焼機構の解明という点では、取扱い上の危険や困難さゆえに、あまり進展していないのが現状である。

著者らは、配管からナトリウムが漏えいした際に想定される噴霧燃焼に関連して、この基礎となる単一液滴の燃焼挙動を解明するとの立場で、液体金属ナトリウムを落下液滴燃焼という形態で取扱ってきており、ナトリウム液滴の着火遅れ時間に及ぼす各種要因(初期温度、酸素濃度、初期液滴直径、相対速度)の影響を実験および解析の両面から調べ報告してきた⁽⁹⁾。

本研究では、ナトリウム液滴の燃焼に注目し、この特徴を明らかにするために、 D^2 則の成立の有無、燃焼速度定数、火炎直径や火炎・液滴直径比の時間変化などを実験的に調べてきた。さらには、燃焼液滴の落下挙動を明確にするため、落下速度や落下距離を測定するとともに、落下燃焼液滴の抵抗係数に関する検討も行ってきた。

* 原稿受付 2004年4月5日。

^{*1} 正員、宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部(〒182-8522 調布市深大寺東町7-44-1)。^{*2} 静岡大学大学院理工学研究科(〒432-8561 浜松市城北3-5-1)。

E-mail: makino.atsushi@jaxa.jp

Fig. 1 Experimental apparatus

2. 実験装置および方法

2・1 実験装置 図1に実験装置の概要を示す。実験装置はおもに、燃焼室、液滴生成装置、ヒータ、酸素濃度計、および燃焼室内を酸化剤雰囲気にするための酸素・窒素ボンベ、コンプレッサ、送風機から構成されている。燃焼室は48 mm×87 mmの長方形断面で、全長25 mの筒形である。ナトリウムの酸化防止のためグローブボックス内は窒素で満たされ、燃焼室内とは仕切弁で区切られている。燃焼室には窒素、酸素、空気の混合気(大気圧、室温、流速0.5 m/s)を流し、燃焼ガスはコンプレッサを用いて強制排出している。

ナトリウムは液滴生成装置内で熔融させ、窒素で加压した後、バルブを開くことによりノズルから吐出される。ノズルはヒータに固定されており、ヒータの設定温度を変えることにより、最高773 Kまで液滴の初期温度を変えることが可能である。また、ノズルの交換により、初期液滴直径を0.6~6 mmの間で変えることもできる。

2・2 実験方法と撮影方法

2・2・1 液滴直径の時間変化の測定 実験においては、デジタルビデオカメラを用いて落下する燃焼液滴を撮影し、得られた画像から液滴直径の時間変化を測定し、これにより燃焼速度定数を求めた。図2に撮影機器の構成図を示す。図2中の矢印は信号の流れを示している。

撮影機器は、液滴生成装置に液滴吐出の信号を送る

Fig. 2 Construction of recording apparatus

ストロボスコープ、その信号を受けて強力なストロボスコープを発光させるための遅延装置とストロボスコープ制御器、ストロボのランプ、そして撮影用の接写レンズを取付けたデジタルビデオカメラ(シャッタースピード1/10 000 s)、さらにバックライト撮影用のランプから構成されている。デジタルビデオカメラは燃焼室前面に複数台設置されており、固定したまま上下方向への移動が可能である。撮影した液滴の画像はパーソナルコンピュータに取り込み、回転円体球形近似式を用いて液滴直径を算出している。

得られた液滴画像の吐出後の経過時間については、吐出信号と同期させたストロボスコープの光をデジタルビデオカメラに取り入れ、その光が記録されてから何こまめに液滴画像が記録されているかを調べ、これによって経過時間を算出している。

2・2・2 落下速度の測定 この実験においては、液滴生成装置の吐出圧力を微小にし、ノズル先端で液滴を少しずつ膨らませ、初期液滴直径を5~6 mmとしたうえで自由落下させている。そして、液滴が落下し燃焼するようすをデジタルビデオカメラ(シャッタースピード1/30 s)で順光撮影し、画像1こまあたり(1/30 s)に進んだ発光軌跡の長さを測定することにより、落下速度を算出した。さらに、画像からは落下距離の時間変化をも測定している。なお、この測定においては、液滴発光後の時間変化のみを測定対象としている。

3. 落下速度の計算

液滴の落下速度の測定結果と比較をするために、計

算による落下速度の算出も行った。液滴の自由落下を記述する運動方程式は以下のとおりである。

$$m \frac{dV}{dt} = mg - m'g - R \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m は液滴の質量、 V は落下速度、 t は時間、 g は重力の加速度、 m' は液滴体積が占める空気質量で、右辺第1項は重力、第2項は浮力、第3項は抵抗力である。酸化剤流速を無視したうえで、液滴半径 r 、空気密度 ρ_a 、抵抗係数 C_d を用いて抵抗力 R を表示すると $R = C_d(\pi r^2)\rho_a V^2/2$ となる。なお、等温場での剛体球(直径 d)の C_d はレイノルズ数($Re = \rho_a Vd/\mu$)の関数として次のように与えられている⁽¹⁰⁾。

$$Re < 0.1 : C_d = 24/Re$$

$$Re < 6\,000 : C_d = \left(\sqrt{\frac{24}{Re}} + 0.5407 \right)^2$$

$$500 < Re < 100\,000 : C_d = 0.44$$

空気密度 ρ_a はナトリウム密度 ρ_d に比べて十分小さく、浮力の効果は無視できるため、式(1)は

$$\frac{dV}{dt} = g - \frac{3}{4} \frac{\rho_a C_d}{\rho_d d} V^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、これにより落下速度が求められる。計算の際に用いた物性値は以下のとおりである。

着火前 ナトリウム密度： $\rho_d = 832 \text{ kg/m}^3 (773 \text{ K})$
 空気密度： $\rho_a = 0.7842 \text{ kg/m}^3 (450 \text{ K})$
 空気粘性係数： $\mu = 2.517 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} (450 \text{ K})$
 着火後 ナトリウム密度： $\rho_d = 748 \text{ kg/m}^3 (1\,200 \text{ K})$
 空気密度： $\rho_a = 0.5878 \text{ kg/m}^3 (600 \text{ K})$
 空気粘性係数： $\mu = 3.082 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} (600 \text{ K})$

なお、着火後の物性値に関しては、液滴温度が沸点に達しているものとしている。また、気流の代表温度については、雰囲気温度 300 K に重みをもたせるという Sparrow の $1/3$ 則⁽¹¹⁾ で決定している。

4. 実験結果および考察

4.1 液滴直径の時間変化 酸素濃度 21% (質量分率 0.23)、初期温度 723 K における液滴直径の時間変化、ならびに各経過時間における液滴のようすを図3(a)に示す。初期液滴直径は $1.9 \pm 0.1 \text{ mm}$ で、液滴が吐出されてからの時間を横軸に、液滴直径の二乗を縦軸にとっている。図3中の●印は未着火を、○印は燃焼の進行を示している。着火は液滴吐出し後、約 0.3 s ほどで生じており、この着火遅れ時間については以前の報告⁽⁹⁾と一致している。図3より燃焼開始後の液滴直径の二乗は、実験範囲内においてはほぼ直線的に減少しており、 D^2 則の成立が確認できる。燃焼速度定数については $3.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ と求められた。

(a) Temporal variation of the square of the droplet diameter

(b) Temporal variation of the flame diameter and the flame/droplet diameter ratio

Fig. 3

燃焼時の液滴のようすについては、図3中の写真より、時間の経過に伴い、まず液滴表面の一点から発光が生じ、これが次第に液滴全体を包み込み、その後、強い発光を伴う火炎が形成されることがわかる。特に着火においては、ナトリウムの蒸気圧が温度 773 K ですら 5 mmHg 程度と低いため、液滴表面での反応が重要な役割を果たしていると推察されるが、発光開始時に気相火炎が存在していないという観察事実は、このことを裏付けている。一方、火炎が形成され、液滴温度が上昇した場合には、他の炭化水素燃料と同様、気相中での反応が現象を支配していることが確認できる。

実験により得られた燃焼速度定数は、落下液滴を用いていることから、強制対流下での値であり、燃焼性について他の燃料と直接比較することはできない。

強制対流の影響については Frössling の公式⁽¹²⁾が示すように $K = K^0(1 + 0.276 Re^{1/2} Pr^{1/3})$ で表されるので、強制対流がない場合の燃焼速度定数 K^0 はこの式を用いて求められる。これを行うと、燃焼速度定数 K^0 としては約 $1.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ という値が得られ(付録参照)、燃焼速度定数に関しては一般の炭化水素燃料と

(a) Temporal variation of the square of the droplet diameter

(b) Temporal variation of the flame diameter and the flame/droplet diameter ratio

Fig. 4

(a) Temporal variation of the square of the droplet diameter

(b) Temporal variation of the flame diameter and the flame/droplet diameter ratio

Fig. 5

大差がないことが明らかとなった。

液滴の火炎直径 D_f ならびに火炎・液滴直径比 D_f/d の時間変化を図 3(b) に示す。液滴吐出後の時間を横軸に、火炎直径 D_f を左側の縦軸に、火炎・液滴直径比 D_f/d を右側の縦軸にとっている。ここで、火炎直径とは、図 3 中に示すように、液滴の落下方向に垂直な方向の最大火炎直径 D_f のことである。火炎形成後の火炎直径は最初増加し、その後減少しており、この傾向については一般の炭化水素燃料と同様である。

一方、火炎・液滴直径比については増加した後、ほぼ一定値となっている。一般の炭化水素燃料では、このような燃焼挙動は酸化剤濃度が高い場合にのみ観察され、空気中での燃焼では D_f/d の値はつねに増加傾向となることが知られている⁽¹³⁾。つまり、ここで観察されたような燃焼挙動をもつということは、ナトリウム燃焼が、空気中においてさえも、酸化剤濃度が高い状態で進行していることを示唆しており、それゆえ、一般の炭化水素燃料よりも燃焼性が良好ということになる。

同様な実験を、酸素濃度が低い場合と高い場合についても実施しており、それらの結果を図 4 および図 5

に示す。図 4 は酸素濃度 10% (質量分率 0.11)、初期温度 773 K、初期液滴直径 1.85 ± 0.05 mm の場合であり、図 5 は酸素濃度 30% (質量分率 0.33)、初期温度 723 K、初期液滴直径 2.1 ± 0.1 mm の場合である。いずれの酸素濃度においても、燃焼時には、液滴直径の二乗は時間の経過とともにほぼ直線的に減少しており、 D^2 則の成立が確認できる。燃焼速度定数については、酸素濃度 10% の場合には $2.8 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、酸素濃度 30% の場合には $5.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ という結果が得られた。燃焼液滴のようすについては、酸素濃度が高いほど火炎の発光強度が強く、しかも火炎は液滴表面からより離れた位置に存在している。なお、酸素濃度 30% の場合には、火炎の発光がバックライト光よりも強くなり、それゆえ火炎中の液滴観察に支障をきたすことが多く、結果として、データ数が少なくなっている。

一方、着火に至るまでの液滴のようすについては、酸素濃度によりかなり異なっている。酸素濃度 10% の場合には、初期温度の設定が高いために液滴表面から煙の発生が見受けられるものの、すぐには着火に至らず、徐々に火炎が液滴を包み込んでいくというようすが観察される。これに対して、酸素濃度 30% の場合

には、液滴表面のある一点で発光が生じると、強い発光を伴いつつ火炎が急激に液滴を包み込んでいる。なお、酸素濃度 30% のときの特徴的な現象としては、ノズルから吐出後、約 0.6～0.7 s で微小爆発が頻繁に観測されるということが挙げられる。

火炎直径に関しては、いずれの酸素濃度においても、他の炭化水素燃料と同様、最初増加し、その後減少するという傾向は同じであるが、酸素濃度が 30% の場合には火炎直径の増加・減少の変化が激しくなっている。このことは、酸素濃度が高いと酸素との反応が激しく、火炎が急激に大きくなるが、その分ナトリウムの消費量も増加するため、液滴直径の減少に伴い火炎直径が急激に減少するためと考えられる。なお、一般の炭化水素燃料の場合には、酸素濃度が低いほど火炎直径が大きくなることが知られているが⁽¹³⁾、ナトリウム液滴の燃焼ではまったく逆の傾向が観察された。一般に、酸素濃度の低下は、火炎温度の低下ならびにそこでの燃料消費速度の低下をもたらすのであるが、その影響は火炎のみならず液滴表面にも及び、液滴表面への熱移動量の低下さらには蒸気発生速度の低下をも引き起こしている。一般の炭化水素燃料では、蒸発熱が燃焼熱に比べて格段に小さいため、液滴表面での蒸気発生速度は火炎での燃料消費速度ほど低下せず、それゆえ火炎・液滴間に燃料蒸気が蓄積され、火炎直径の増大が酸素濃度の低下によりもたらされている。一方、ナトリウム液滴の場合には、蒸発熱が燃焼熱の半分程度であるため、液滴表面への熱移動量の低下やそこでの蒸気発生速度の低下が著しく、それゆえ火炎直径の減少が酸素濃度の低下により引き起こされると考えられる。そして、この結果は、ナトリウム液滴燃焼の現象が液滴表面での蒸気発生速度に強く依存していることを示唆している。

火炎・液滴直径比に関しては、酸素濃度が高いほど大きくなることが確認できた。これは酸素濃度が高いほど火炎直径が大きくなるということからも説明できる。また、酸素濃度 30% の場合には最初増加し、その後減少するという傾向であるものの、酸素濃度 10% の場合は 21% の場合と同様、増加した後、ほぼ一定の値となっている。一般の炭化水素燃料では酸素濃度が低いほど D_f/d の増加傾向が顕著であるが⁽¹³⁾、ナトリウムの場合には酸素濃度が低くてもそれほど顕著な増加傾向が表れてはおらず、傾向としては、高酸素濃度中での炭化水素燃料の燃焼と同様な挙動を示している。前述の考察で、ナトリウム液滴燃焼の現象が液滴表面での蒸気発生速度に強く依存していることを指摘したのであるが、ここでの結果は、蒸気発生速度に見合う分

Fig. 6 Temporal variation of the falling velocity and the falling distance

だけ火炎にて燃料蒸気が消費され、火炎・液滴間には燃料蒸気が蓄積されることがないことを示唆しており、この程度の低い酸素濃度でも、反応性の強さゆえにナトリウムと酸素の反応が完結していることを反映しているものと解することができる。

4.2 落下速度の測定

4.2.1 実験結果と計算結果の比較 酸素濃度 21% (質量分率 0.23)、初期温度 773 K において、初期直径 6.0 ± 0.1 mm の液滴を自由落下させた場合の落下速度と落下距離の時間変化を図 6 に示す。横軸には液滴吐出後の経過時間を、左側の縦軸には液滴の落下速度 V を、右側の縦軸にはノズル先端からの落下距離 L をとっている。データ点は実験値で、曲線は数値計算結果である。着火は液滴吐出後 0.5 s 程度で生じており、着火後の液滴の落下速度は緩やかに増加する傾向を示している。落下距離については、徐々に増加する傾向が得られた。

一方、等温場における剛体球の抵抗係数を用いた計算結果は、実験で着火が確認されるあたりでは、落下速度ならびに落下距離は、比較的よい一致を示しているのであるが、時間の経過に伴い実験値と計算結果との隔たりが大きくなっており、燃焼液滴に等温場の剛体球の抵抗係数を用いることがいかに不適切であるかを示す結果となっている。なお、燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数が増大する理由としては、火炎の存在による周囲ガス温度の上昇、それに伴う物性値の変化、さらには液滴表面からの蒸発などが考えられる。

以上のことから、燃焼液滴の抵抗係数を明確にすることは、燃焼挙動や落下挙動の把握のために不可欠と考えられるので、次には抵抗係数を実測してみるこ

Fig. 7 Variation of the drag coefficient

とした。

4・2・2 抵抗係数の算出 図6の実験結果より経過時間ごとの速度変化 dV/dt がわかるので、これを式(2)に代入すれば抵抗係数 C_d を算出できる。ノズル先端からの落下距離 L と抵抗係数 C_d との関係を図7に示す。なお、図7には実験により得られた落下燃焼液滴の軌跡画像も掲げてあり、図7中の①～⑤は軌跡画像の各区間に対応している。ちなみに、これらの区間では Re は500以上であった。区間①では火炎の発光も弱く、まだ完全には着火に至っていないため、抵抗係数は剛体球の値0.44に近い値が得られた。次の区間②および③では、次第に発光強度が増してきており、抵抗係数の値は約1となっている。さらに発光強度が増し、火炎の幅が最大となる区間④および⑤では、抵抗係数の値が約2にまで増加している。抵抗係数の変化はナトリウム液滴の火炎の発光強度の変化、すなわち液滴の温度上昇によく対応しており、高温のナトリウム液滴が低温の雰囲気温度を上昇させ、抵抗係数の増加を引き起こしたことが確認できる。なお、図7には、複数の実験で得られた結果が記載されているが、これらについては発光強度が増大する区間を便宜的に一致させて記載しており、図中に掲げた軌跡画像と必ずしも対応はしていない。

以上、燃焼液滴では燃焼状況により抵抗係数が変化することが判明したので、液滴の落下速度の計算にこの結果を反映させてみた。計算の際には、液滴の発光が確認されるまでは剛体球の抵抗係数を用い、液滴の発光が確認されてから0.1s間は抵抗係数を1とし、その後は抵抗係数を2とした。図6にはこの計算結果も示されており、着火後の速度変化に関して良好な一致が得られるようになった。

Fig. 8 Temporal variation of the falling distance

これまで、燃焼する液滴や固体粒子の抵抗係数については、粒径が小さく $Re < 1$ という場合には解析的に調べられており、表面温度が雰囲気温度よりも高くなると抵抗係数が増加することが報告されているが⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、本研究のように $Re > 500$ という実験条件下での抵抗係数に関する報告はいまだなされていない。このことから、落下液滴の抵抗係数が燃焼状況により変化するということが、実験のうでで明らかされたことは、意義のあることと考えられる。

最後に、核燃料サイクル開発機構(JNC)にて高さ8mの燃焼塔を用いて得られたナトリウム液滴燃焼の実験結果⁽¹⁶⁾と比較することとした。この実験では、ノズルから液滴が離れた瞬間を光ファイバセンサにて検出するとともに、燃焼塔上部から1.9, 3.7, 5.7, 8.0mの各位置に設置したスリットレーザ式通過検出計にて、液滴がそこを通過するまでの時間を検出するというもので、精度の高い実験である。初期温度723K、酸素濃度21%(質量分率0.23)、初期液滴直径約5mmの条件で得られたサイクル機構の実験結果を図8に示す。曲線は計算結果であり、等温場剛体球の抵抗係数を用いると落下距離を過大に評価してしまうことがわかる。一方、本研究で得られた燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数を用いた場合には、実験結果と計算結果との間に妥当な一致が見受けられる。

なお、サイクル機構の実験と同様な条件下(初期温度773K、酸素濃度21%、初期液滴直径 5.1 ± 0.1 mm)でも実験を行っており、図8中にはその結果も記載されている。液滴吐出後1s以内においては、両実験結果に差異は存在しておらず、結果的には、本実

Fig. 9 Temporal variations of the Reynolds number Re and the combustion rate constant K^0

験の精度を確認するものとなっている。

5. 結 論

燃焼室中を落下するナトリウム液滴の燃焼挙動を調べ、以下のことが判明した。

(1) 燃焼ナトリウム液滴の直径の二乗は、実験範囲内において、時間の経過とともにほぼ直線的に減少しており、 D^2 則が成立する。

(2) ナトリウム液滴の着火に関しては、蒸気圧が低いという点からも、表面反応が重要な役割を果たしている。

(3) 強制対流がない場合の燃焼速度定数は、一般の炭化水素燃料の値と同程度で、空気中では約 $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ の値である。

(4) 火炎直径や火炎・液滴直径比の時間変化から判断すると、ナトリウム液滴の燃焼は、空気中であっても、高酸素濃度雰囲気下での炭化水素燃料液滴の燃焼に類似している。

(5) 雰囲気中の酸素濃度が 30% では微小爆発が発生し、燃焼液滴が飛散する。

(6) 燃焼ナトリウム液滴の抵抗係数は、 $Re > 500$ では、等温場剛体球の値 0.44 よりも大きく、燃焼状況によっては約 2 となる。

本研究は、牧野が静岡大学工学部在任中に開始した

消防研究所との共同研究により実施されたものである。支援をいただいた関係各位に謝意を表する。

【付 録】

強制対流がない場合の燃焼速度定数 K^0 を Frössling の公式⁽¹²⁾ $K = K^0(1 + 0.276Re^{1/2}Pr^{1/3})$ を用いて求める際には、まず Sparrow の 1/3 則⁽¹¹⁾ にて気流の代表温度を 600 K としたうえで、 Pr 数としては空気の値 0.709 を用いている。 Re 数としては、代表温度での空気の物性値を用いるとともに、液滴直径の変化ならびに速度の変化を考慮したうえで求めている。 Re 数ならびに燃焼速度定数 K^0 の時間変化を図 9 に示す。実験範囲内では Re 数が 90~125 変化しているものの、燃焼速度定数 K^0 はほぼ一定で、約 $1.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ という値になっている。

文 献

- (1) Gracie, J. D. and Droher, J. J., *A Study of Sodium Fires*, NAA-SR-4383 (1960), 1-84, Atomic International, Canoga Park.
- (2) Newman, R. N., *The Ignition and Combustion of Sodium-A Review*, RD/B/N 2229 (1972), 1-17, Berkeley Nuclear Laboratories.
- (3) 斎藤直・ほか 2 名, 燃焼の科学と技術, 8 (2000), 15-25.
- (4) Richard, J. R., ほか 2 名, *Proc. Combust. Inst.*, **12** (1968), 39-48.
- (5) Morewitz, H. A., ほか 2 名, *Nucl. Eng. Des.*, **42** (1977), 123-135.
- (6) Yuasa, S., *Proc. Combust. Inst.*, **20** (1984), 1869-1876.
- (7) 平成 13 年度研究報告書, 原子力施設の消防防災技術に関する研究, (2002), 67-112, 消防研究所.
- (8) 平成 14 年度成果報告会資料, 原子力施設の消防防災技術に関する研究, (2003), 1-58, 消防研究所.
- (9) 深田博一・牧野敦, 第 41 回燃焼シンポジウム講演論文集, (2003), 513-514.
- (10) Bird, R. B., ほか 2 名, *Transport Phenomena*, 2nd Ed., (2002), 185-188, John Wiley and Sons, New York.
- (11) Glassman, I., *Combustion*, 3rd Ed., (1996), 308-312, Academic, San Diego.
- (12) Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd Ed., (1985), 60-67, Benjamin/Cummings, Menlo Park.
- (13) Law, C. K., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **8** (1982), 171-201.
- (14) Kassoy, D. R., ほか 2 名, *Phys. Fluid*, **9** (1966), 671-681.
- (15) Makino, A., *Combust. Sci. Technol.*, **81** (1992), 169-192.
- (16) 堂田哲広・ほか 2 名, ナトリウム液滴落下燃焼実験 (FD-2) 研究報告, (2003), 1-37, 核燃料サイクル開発機構.