

UDC 536.532:
669-426:
662.75

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-184

金属線へ衝突する液滴の現象

田丸 卓・乙幡 安雄

1970 年 9 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-141	超音速二次元翼列予備実験風洞について	1968年7月	近藤 博, 坂口 一晋 八山 優, 高森 侖
TM-142	二次元スラットおよびスロッチェッドフラップの実験的研究 (III)	1968年7月	犬丸 矩夫, 高橋 侖
TM-143	端面一体巻きフィラメント・ワインディング容器の静圧強度および疲れ強度	1968年8月	竹中 幸彦, 朝田 洋雄 野口 義男
TM-144	真ひずみ計の試作	1968年8月	竹中 幸彦, 朝田 洋雄 野口 義男
TM-145	スピンを伴うロケットの運動を計算するプログラム	1968年8月	戸川 隼人, 石黒登美子 山本 浩通
TM-146	双発STOL機の飛行試験 —実用運用包囲線および離着陸特性—	1968年8月	幸尾 治朗, 岡 遠一 塚野 雄吉, 鎌田 幸男 小野 孝次
TM-147	浮動振子型加速度計の試作	1968年9月	大月 正男, 鈴木 孝雄 円居 繁治
TM-148	吹出しフラップ翼の高揚力特性	1968年9月	小橋安次郎, 宮沢 政文 西 武徳
TM-149	NAL-16-TR ロケットの研究試作	1968年10月	ロケット性能研究室
TM-150	リフトジェット VTOL 機の着陸における水平方向の減速について	1968年11月	西村 博史
TM-151	フラッタ解析法の再検討 —フラッタ解析法の研究 その I—	1968年12月	市川 輝雄
TM-152	ノズル内の突起物によるロケットエンジンの側分力	1969年1月	檜崎 哲二, 中野 富雄
TM-153	FA-200 改機の風洞試験 (I) プロペラ付き	1969年2月	広末 健一, 坂井 紀穂 高橋 宏, 綿貫 忠晴
TM-154	FA-200 改機の風洞試験 (II) 高揚力装置付き	1969年2月	広末 健一, 木村 友昭 高橋 宏, 綿貫 忠晴
TM-155	極超音速風洞 M7 ノズル較正試験	1969年2月	橋本 登, 吉沢 昭 穂積 弘一
TM-156	自動制御系の動特性を計数型電子計算機により模擬するための汎用プログラム	1969年3月	戸川 隼人, 丸山 治雄
TM-157	機上用超小形エンコーダの研究	1969年3月	中 正夫, 山本 芳樹 大石 晃
TM-159	可動アイアンバードによる姿勢制御の実験	1969年5月	西村 博史, 藤枝 郭俊
TM-160	極超音速風洞計測装置について	1969年7月	長洲 秀夫, 吉沢 昭 松崎 貴至
TM-161	燃料蒸発管に関する研究 (II) —加熱蒸発管の燃料未蒸発分捕集—	1969年8月	鈴木 邦男, 田丸 卓 乙幡 安雄
TM-162	境界層内圧力変動および板の振動変位の測定	1969年9月	藤森 義典, 山崎 浩
TM-163	ある双発プロペラSTOL機の動安定風洞試験	1969年9月	別府 護郎, 鈴木 友昭
TM-164	ブレードのフラッピング運動をバネで拘束したロータのピッチダンピングについて	1966年10月	別府 護郎, 岡 遠一
TM-165	フェノール系複合材の環境試験結果	1969年11月	古田 敏康, 野口 義男
TM-166	ガスタービン用缶形燃焼器における燃焼領域のガス組成と燃焼状態	1969年11月	大塚 貞吉, 斎藤 隆 堀内 正司, 本間 幸吉 宮坂 彰
TM-167	YS-11A-300型輸送機の胴体疲労試験 —中部胴体前方大型貨物口部および後方乗降口部付近—	1970年1月	竹内 和之, 川島 矩郎 熊倉 郁夫, 松岡 陽一

金属線へ衝突する液滴の現象*

田丸卓**・乙幡安雄**

Phenomena of an Impinging Droplet against a Wire

By

Takasi TAMARU and Yasuo OPPATA

The phenomena of a liquid droplet impinging against a cold and a heated wire are investigated experimentally. The droplet results in adhesion, recombination, separation, or shattering depending on the parameters involved. These phenomena can be classified roughly with the non-dimensional factors, $\rho_d \mathcal{D} v^2 / \sigma$ and \mathcal{D} / D , where ρ_d = density, \mathcal{D} = diameter, v = impinging velocity, σ = surface tension, of the liquid droplet, and D = diameter of the wire.

The adhesion region can be expressed as

$$\frac{\rho_d \mathcal{D} v^2}{\sigma} \cdot \frac{\mathcal{D}}{D} < K$$

The observed constant K was 50 and 43 for water and isooctane respectively.

When the temperature of the wire is high enough, the Leidenfrost phenomenon occurs and the droplet shatters.

The possibility of application of these phenomena to the gas turbine type combustion chamber is also discussed briefly.

1. まえがき

二種類の液体をもちいて、種々の直径の金属線へ液滴が衝突する現象を実験的に考察した。

主として、次の四事例にたいする疑問を明らかにすることを目的とした。

(1) 熱線風速計を液滴の浮遊している気流中で使用すると熱線へ液滴が衝突してパルス状の出力変化が現われる。図1にその液滴の多い場合(a)と少ない場合(b)を示す。この現象を応用して気流中を飛ぶ液滴粒径の定量的測定はできないであろうか。

(2) ガスタービン用蒸発形燃焼器に使われている燃料蒸発管のうち、図2に示すウォーキングステッキ形のものには、タービュレンスピン(turbulence pin)と称するものがある。このピンに燃料液滴が衝突した場合、これが液滴の微粒化や蒸発にどのような作用をなすか。

(3) 燃焼ガスなど液滴を含む高温気体の温度測定のために、液滴が熱電対へ衝突する可能性がある。そ

のときの液滴と熱電対間の現象、および測定におよぼす影響はどうか。

(4) 液滴が金属線へ衝突した場合の微粒化、附着または蒸発などの現象はどのような因子が大きな影響をもつか。

これまでに、気流中での液滴の破壊や微粒化、また高温平板上に衝突した液滴の挙動については、多くの研究者によって報告されている。

しかし、ここに問題としたような金属線に液滴が衝突する現象に関しては、参考にできる文献が皆目みあたらない。

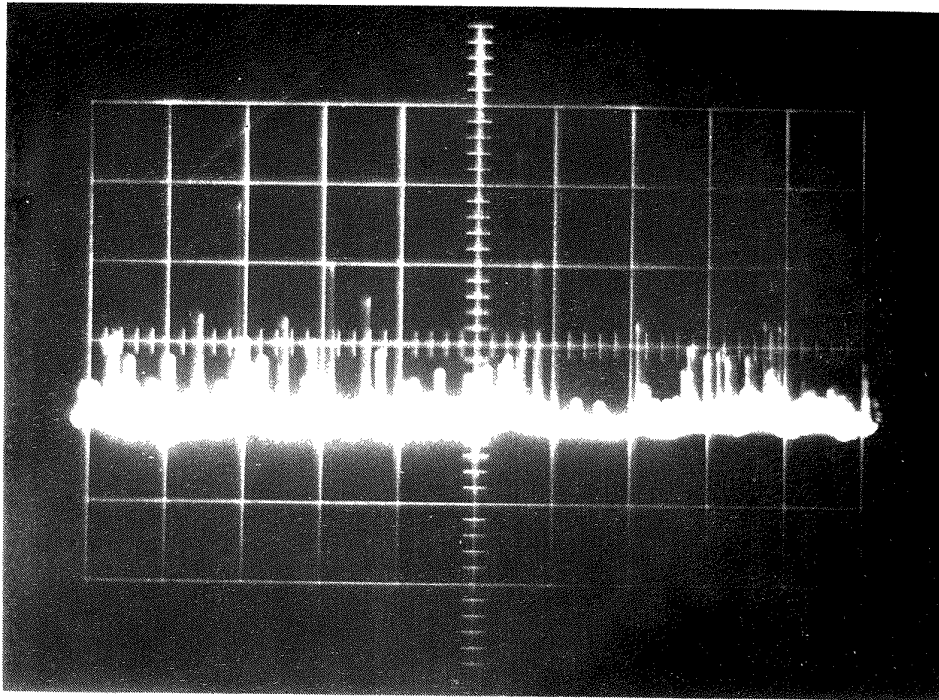
そこで簡単な装置でできる範囲で実験をおこない、これを考察した。

2. 記号

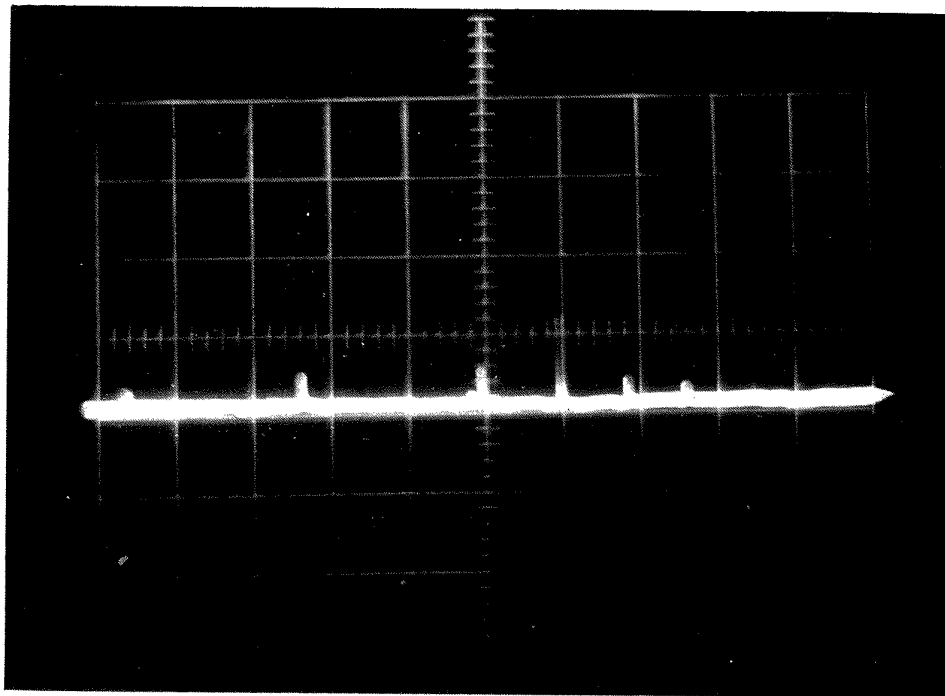
- C_D : 球の抵抗係数
- C_e : 蒸発速度定数
- C_p : 液体の比熱
- D : 金属線直径 (mm)
- \mathcal{D} : 液滴直径 (mm)
- g : 重力の加速度

* 昭和45年3月28日

** 原動機部



(a)



(b)

図 1 熱線風速計へ液滴が衝突した場合の出力

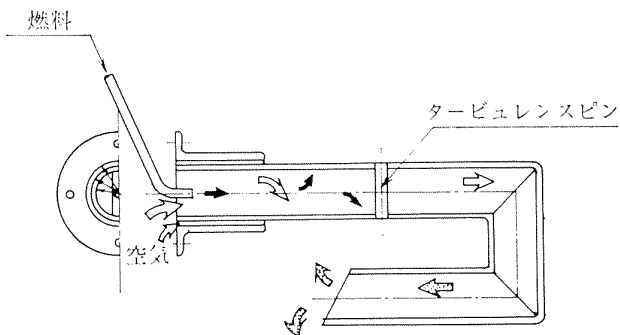


図 2 ガスタービン用燃焼器に使用される
ウォーキング・ステッキ形蒸発管

- h : 液滴落下距離
- H_L : 液体の蒸発潜熱
- K : 比例定数
- q : 熱量
- R : 空気抵抗
- T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- T_b : 燃料蒸発温度 ($^{\circ}\text{C}$)
- v : 液滴速度
- W_{ed} : 液滴ウェーバ数
- w_f : 燃料流量

- ρ : 密度
- ν : 動粘性係数
- σ : 表面張力
- τ : 時間

添字

- o: 初期値
- a: 空気
- d: 液滴

3. 実験装置および方法

使用した装置の概略を図3に示す。

図3において、オーバーフロータンク①に蓄えた供試液体（蒸留水、またはイソオクタン）を滴下口④を通して金属線⑥の上に滴下させた。

それをストロボスコープ⑧の照明により、観察ないし写真撮影をした。

撮影は、いわゆる影写真法では金属線、あるいはその支持部などのため現象が明確でないことが多いので斜めの上方から照明をした直接写真法によった。

しかし、液滴は透明なので、コントラストがつけにくく、両側に反射板をもうけるなどの手段を講じた。

それでも屈折率の比較的小さいイソオクタンの場合はコントラストの良い写真を撮影するのに困難があった。

使用した液滴滴下口は、図4に示すように注射針を

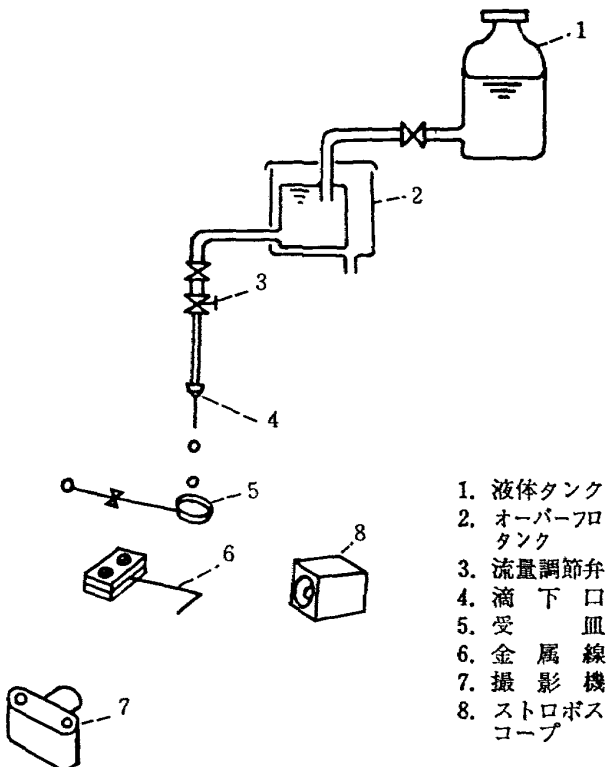


図3 実験装置概要

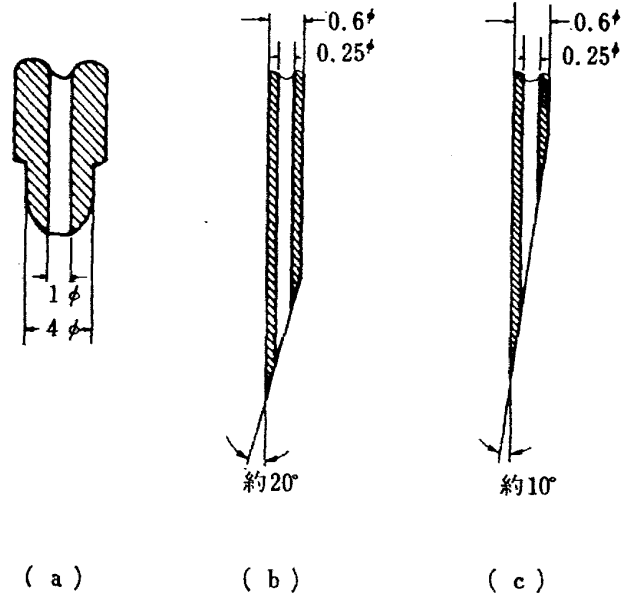


図4 使用液滴滴下口

表1 実験した液滴直径 (単位: mm)

滴下口	水滴直径	イソオクタン滴直径
(a)	3.68	3.18
(b)	2.77	2.04
(c)	2.37	1.7

(滴下口の種類については図4参照)

表2 金属線径および材質

線径 D (mm)	材質
0.1	銅
0.25	銅
0.3	銅
0.7	アルミニウム
1.0	銅
1.6	アルミニウム
2.0	銅

加工して製作した三種類のものである。

それらを使うことにより、表1に示す種類の液滴直径を得ることができた。

金属線を常温の条件下で使用する場合、表2に示す線径、材質のものを持ちいた。

それらは現象の観察を容易にするため、L字形に曲げ、視線、ないしはカメラの光軸と同方向の部分に液滴が衝突するように設置して使用した。

金属線加熱の条件下では、図5に示すようなステンレスによりシースされた電熱線（シースヒータ）を使

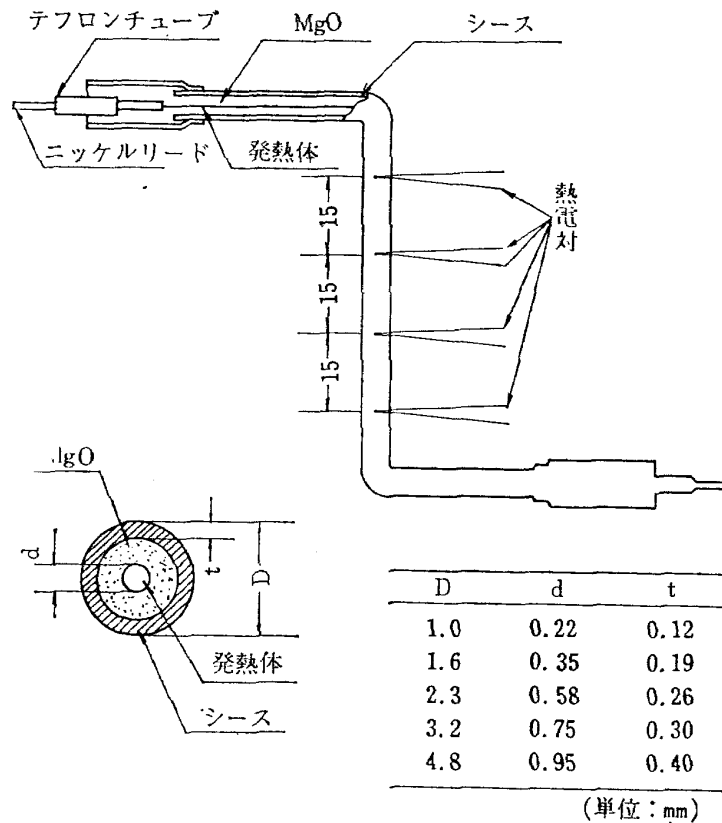


図5 加熱金属線

用した。線径の細いものについては直接通電加熱をしたが、局所温度あるいは瞬間的温度変化にたいする計測に難があり信頼性のあるデータをとれなかった。

シースヒータによる場合の表面温度の測定は、図5にも示されているように、直径 0.1 mm の CA 熱電対を、液滴衝突点を中心として両側に二か所ずつシース表面上にスポット溶接し、その4点の温度分布から液滴衝突点温度を外挿した。

3.1 現象の観察および撮影

試料液滴の滴下は、一定の時間間隔で反復的に起こられるので、ストロボスコープの光源により任意の位置での静止像として観察できる。

撮影は、ストロボスコープ光源照明による 35 mm カメラ、および写真用フラッドランプ照明による高速撮影機によっておこなった。

3.2 液滴の衝突速度

液滴が金属線へ衝突する速度は、滴下口先端から剛体球が真空中を自由落下した場合にひとしいと仮定しその落下距離から計算で求めた。

すなわち次の影響因子は無視した。

- (1) 落下液滴形状の真球からのゆがみ
- (2) 液滴周囲の蒸気境界層の影響

- (3) 空気による形状抵抗
- (4) 液滴の蒸発による質量減少
- (5) 液滴の蒸発による粒径減少
- (6) 空気による浮力

このうち、(1) は写真判定によるとそれほど著しい場合はなく、長半径、短半径の比にして数 % 以内のていどである。

(2) は (3) を考えるうえに重要であるが、Eisenklam ら¹⁾の実験によると、空气中を蒸発しながら自由落下する液滴の空気抵抗は、剛体球のものほとんど変わらない。したがってその影響は無視できる。

(4) と (5) の影響は常温空气中を自由落下させる今回の実験条件では全く小さな値である。

たとえば、今回使用した液体のうち比較的蒸気圧の高いイソオクタンの場合について検討してみる。

図6に実験で求めた静止空气中の各霧囲気温度にたいするイソオクタンの蒸発速度定数 C_e を示す。

この値は、初期粒径 D_0 の液滴が蒸発して τ 秒後に粒径 D になったものとする、

$$C_e = \frac{D_0^2 - D^2}{\tau} \quad (1)$$

で表わされる定数である。

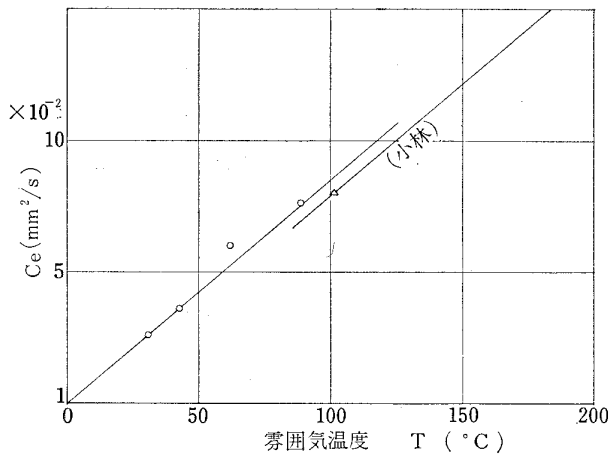


図 6 イソオクタンの蒸発速度定数

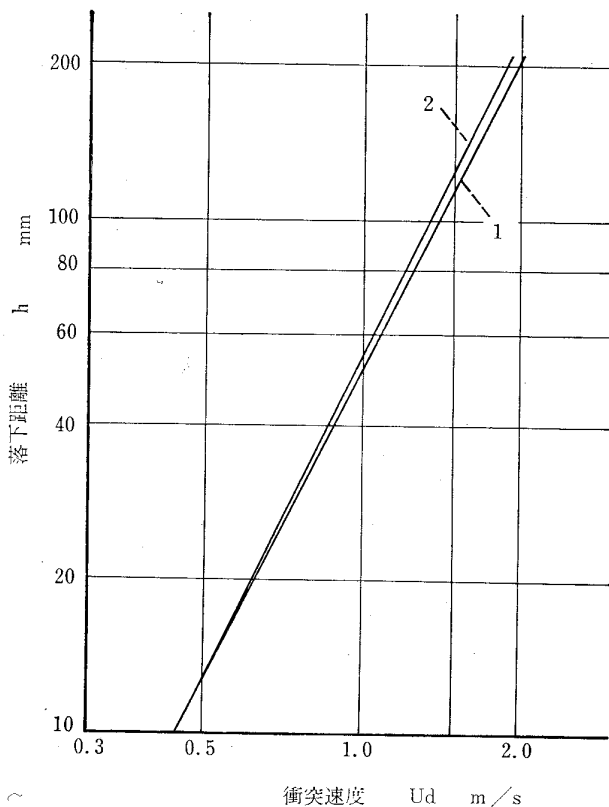


図 7 液滴の落下距離と速度の関係

これから本実験の場合の最大落下距離 (20 cm) を落下するに要する時間 (約 0.2 秒) に、蒸発によって初期粒径 2 mm の液滴が直径を減ずるていどを計算してみると、1%よりはるかに小さい値となる。

実際には、落下中に空気との相対速度の影響を受けるが、それを考慮しても無視できる値である。気流と相対速度のあるときのイソオクタン液滴の蒸発速度は実測しなかったが、R.J. Priem ら²⁾によると、イソオクタンより蒸気圧の高い *n*-ヘキサンの場合でも、このような短時間では、相対風速 2 m/s のとき数%以下の体積減少を示すにすぎないことが報告されてい

る。

したがって、(4) と (5) の影響は無視した。

(3) と (6) を考慮に入れた場合は、真空中の剛体球落下と考えた場合にくらべ、最大 5% 以下の相違がでた。

その二つの場合について落下距離にたいする速度を示したのが図 7 である。そのなかで、線 1 は真空中を剛体球が落下すると考えた値を示し、線 2 は (3)、(4) を考慮に入れて計算をおこなった結果のうち、最も著しい相違を示したイソオクタンの最小粒径の場合を示した。この計算の詳細は付録に示す。

4. 実験

4.1 液滴衝突現象の分類

液滴が金属線に衝突したさいの液滴の形状変化は、金属線直径、液滴直径、衝突速度、金属線温度などの条件によりさまざまな様相を呈する。

著者らは液滴の破壊形態からそれらを基本的に次の四つのタイプに分類した。

(1) 付着：金属線への衝突後、液滴全部が金属線に付着してしまう。

(2) 合体：衝突の瞬間、液滴は金属線によって二つに分断されるが、金属線を通過後、再び一体となって落下する。

(3) 分離：金属線により二つに分断された液滴がそのまま合体することなしに別々に落下する。

(4) 分散：衝突後、数個の液滴に分かれて落下する。

しかしながら、現象的に必ずしも明確に上記四分類の一に断定しがたい場合もあった。

たとえば、液滴が金属線によって二つに分断される場合を分離としたが、そのさい小さな液滴が飛沫として現われる場合がある。その場合も、比較的大きな液滴二個に分かれていれば分離としたが、小さな飛沫液滴の生成が著しい場合は分散と判定した。

4.2 代表的液滴衝突形態

次に 4.1 の分類の代表的なものを示す。

図 8 および図 9 は、それぞれ常温の金属線に水、およびイソオクタンの液滴が衝突した場合の模様について示している。

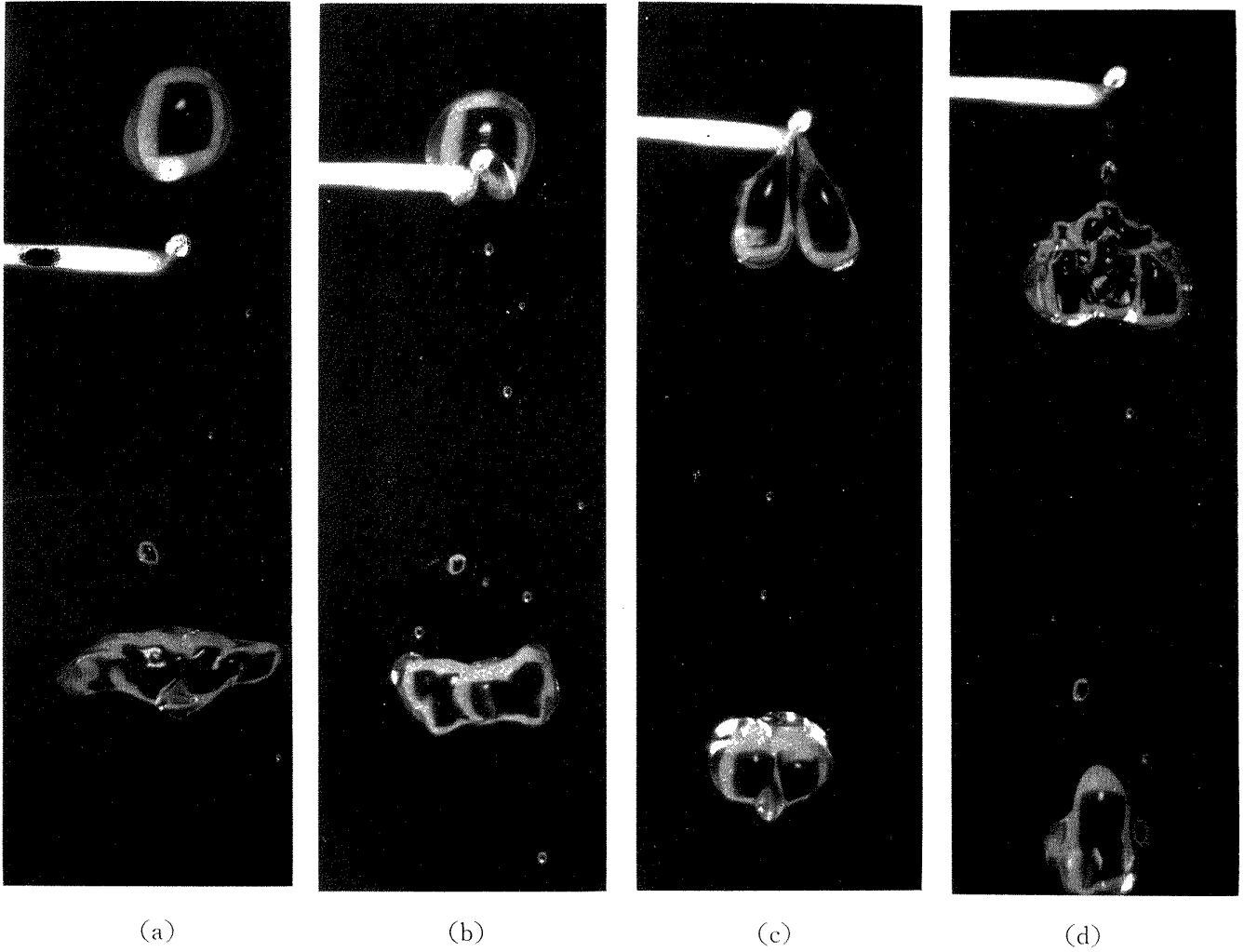
図 8 は水滴の合体現象を示す。この図において、金属線上に落下してきた液滴は、衝突によって (b) のように金属線によって鈍いくい込みを生じる。金属線がくい込んだ位置より上半球は、表面にショックのためのシワが生じているていどで、大きな変形はみられ

ない。

その後、液滴は金属線によって (c) のように二つに分断される。これが互いに接触し、同図の (d) のように表面張力の働きによって再びひとつ液滴となる。

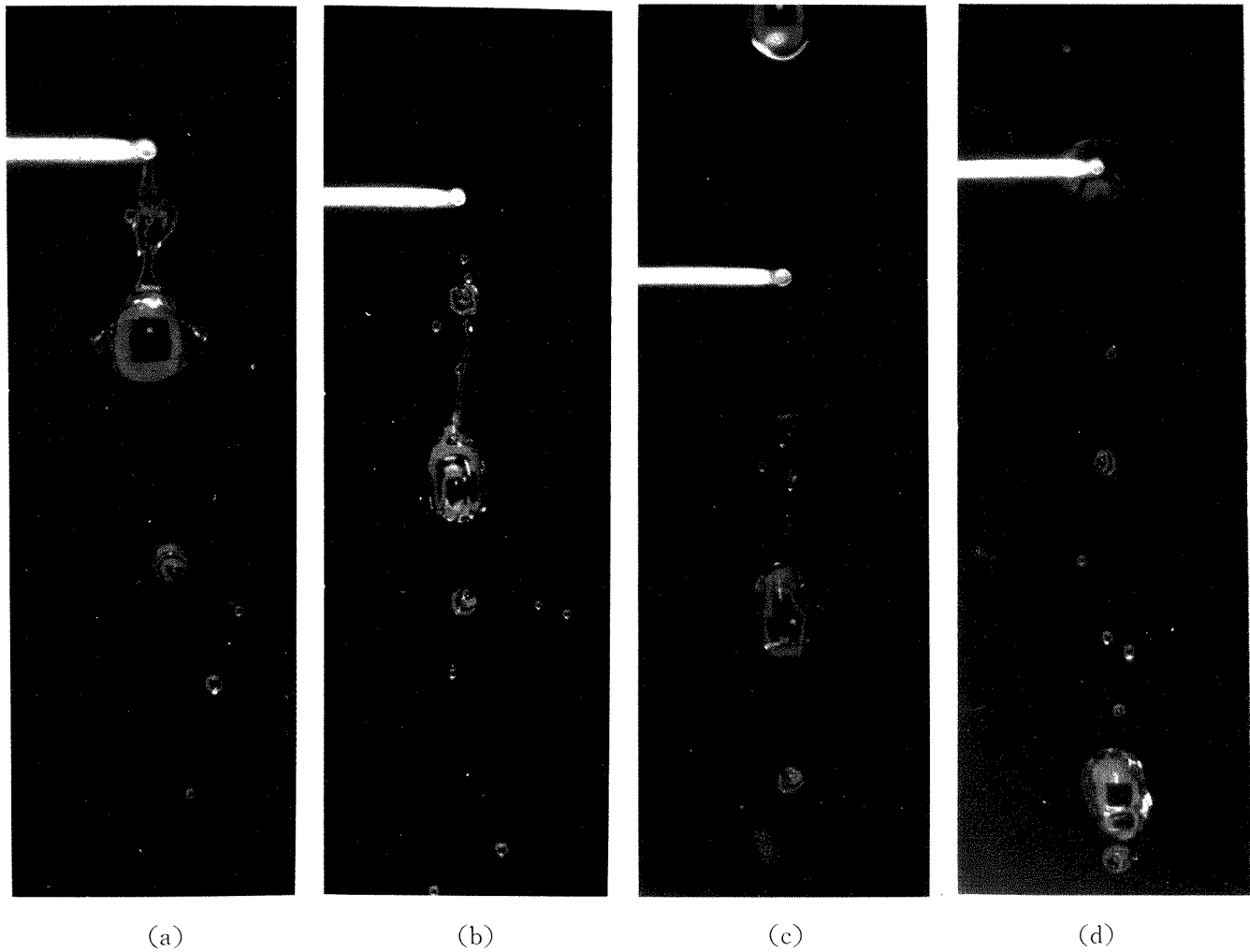
分離現象の場合には、図 10 に示すように、二つに分断された液滴は、金属線の両側に分かれたまま落下する。

イソオクタンの場合にはこの分離に分類できる場合がない。その分離に相当する領域では分散がおきてし



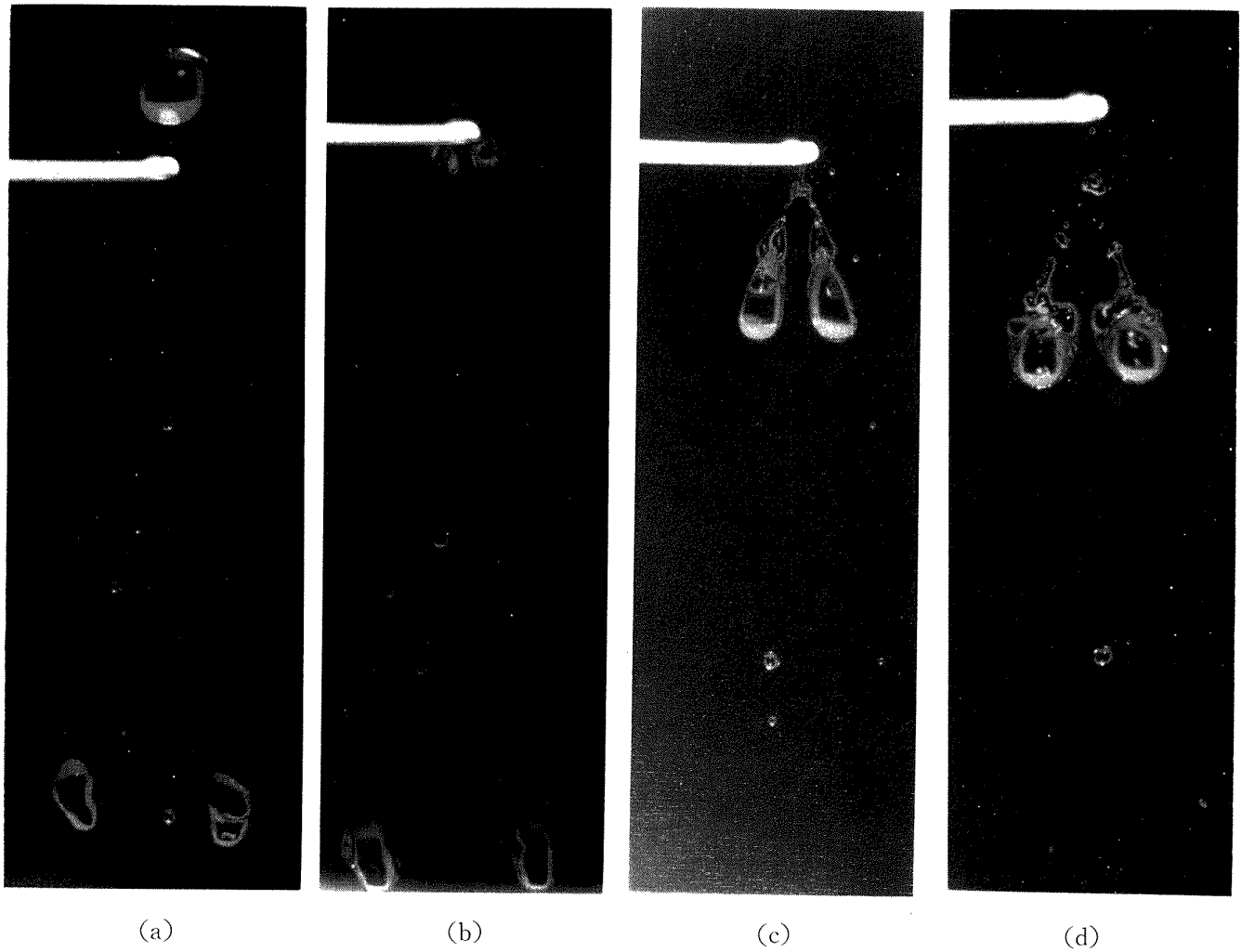
水; $D=3.68\phi$, $D=0.25\phi$, $v=1.36\text{ m/s}$, 合体

図 8 液滴の破壊状態



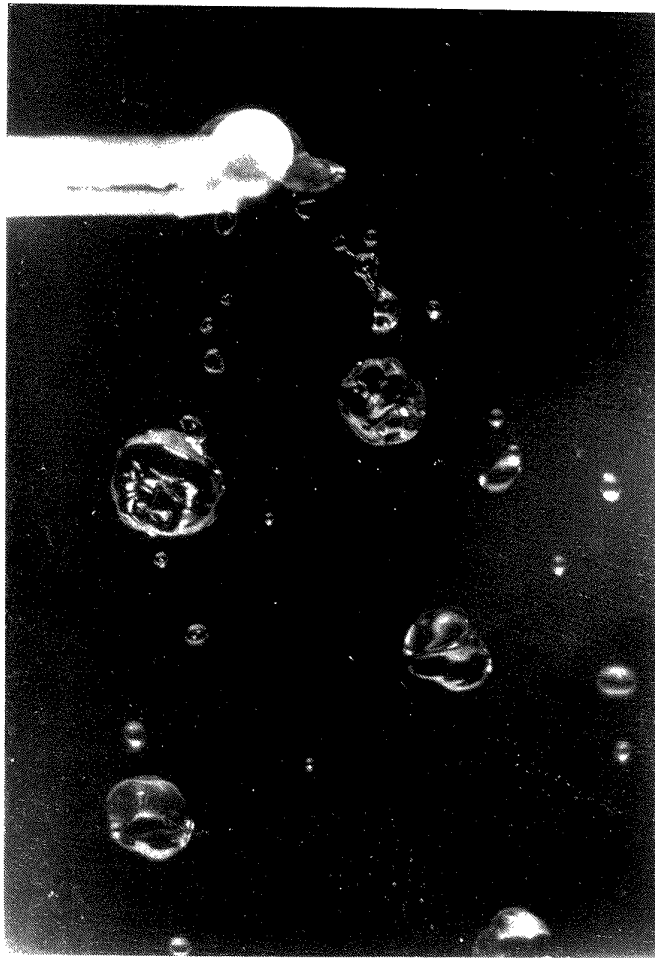
イソオクタン; $\mathcal{D}=3.18\phi$, $D=0.25\phi$, $v=1.35\text{ m/s}$, 合体

図 9 液滴の破壊状態



水; $D=3.68\phi$, $D=0.7\phi$, $v=1.86\text{ m/s}$, 分離

図 10 液滴の破壊状態



(a)

水; $D=3.68\phi$, $D=2.0\phi$, $v=1.36\text{ m/s}$

図 11 水滴の分散の場合を示す。同一の液滴状態変化にたいし3回のストロボ発光による写真である。

まう。

また、合体の場合でも分離の場合でも、金属線から液滴が離れるさいに長い尾をひく。この尾の部分がち切れると小さな液滴が余滴として派生する。ち切れて金属線側に残ったその尾の一部は、残留液滴となって金属線に付着したまま残る。

分散現象の場合には図 11、図 12 のように液滴が金属線に衝突した途端にそのショックによって小液滴が派生する。そしてその後も金属線からひく液滴の尾などから数個の余滴を派生する。したがって分散の場合には、数個ないし十数個の小液滴粒子を生ずる。

4.3 液滴直径が一定の場合の状態図

図 13~18 は、直径がそれぞれ一定の水滴およびイソオクタン液滴が様々な直径の金属線に衝突したとき、その衝突速度によってどのような現象がおきた

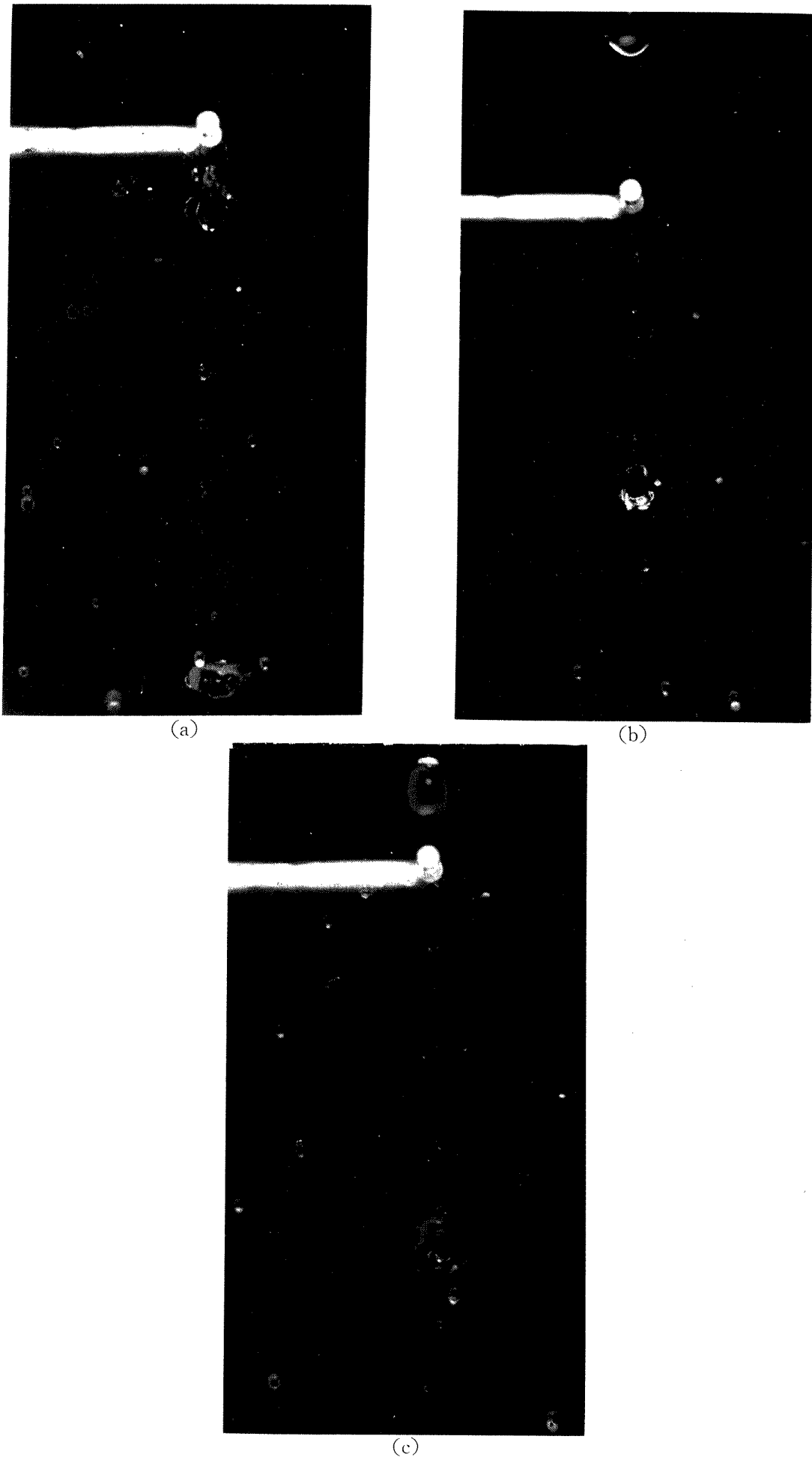
かを、4.1 の分類によって示した状態図である。

たて軸に液滴衝突速度、よこ軸に金属線直径をとって実験条件を示してある。

たとえば、直径 2.37 mm の水滴が金属線に衝突する場合を示した図 13 についてみる。

金属線が直径 1 mm のとき、約 1.2 m/s 以上の速度で衝突すれば分離となり、それ以下の速度では、合体現象を示す。さらに遅い速度、すなわち 0.75 m/s 以下では、金属線に液滴がすべて付着してしまう。線直径が 2 mm の場合には、衝突速度が 1.3 m/s 以上では分散になり、1.1~1.3 m/s の範囲では分離となる。1.1 m/s 以下の速度で衝突した場合には線に付着する。

図 14 と 図 15 についても同様、それぞれ 2.77, 3.68 mm の水滴が衝突する様子を示した。



イソオクタン; $D=3.18\phi$, $D=1.0\phi$, $v=1.35\text{ m/s}$, 分散
図 12 液滴の破壊状態

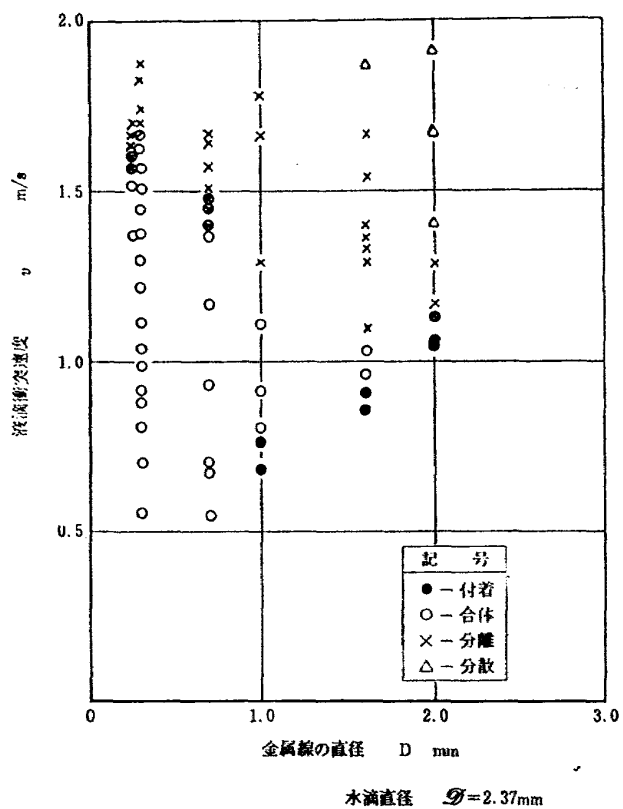


図 13 水滴直径一定の場合の衝突状態図

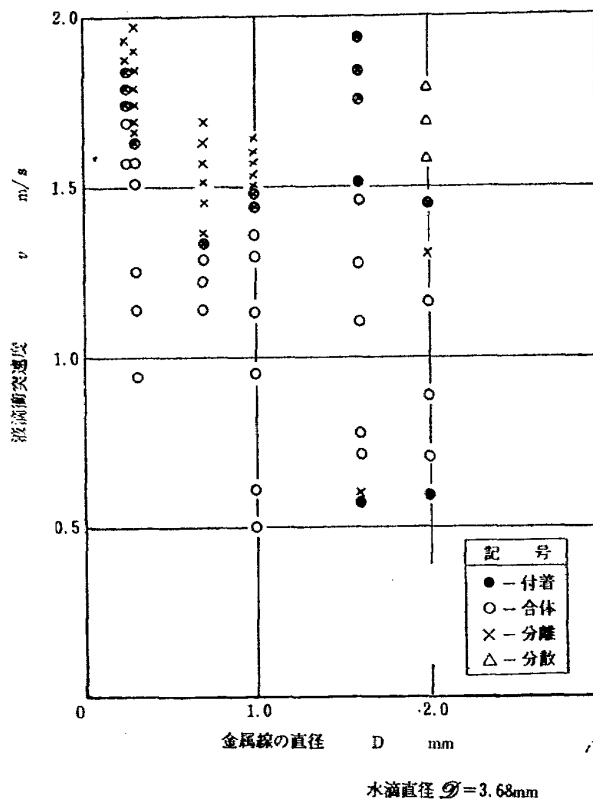


図 15 水滴直径一定の場合の衝突状態図

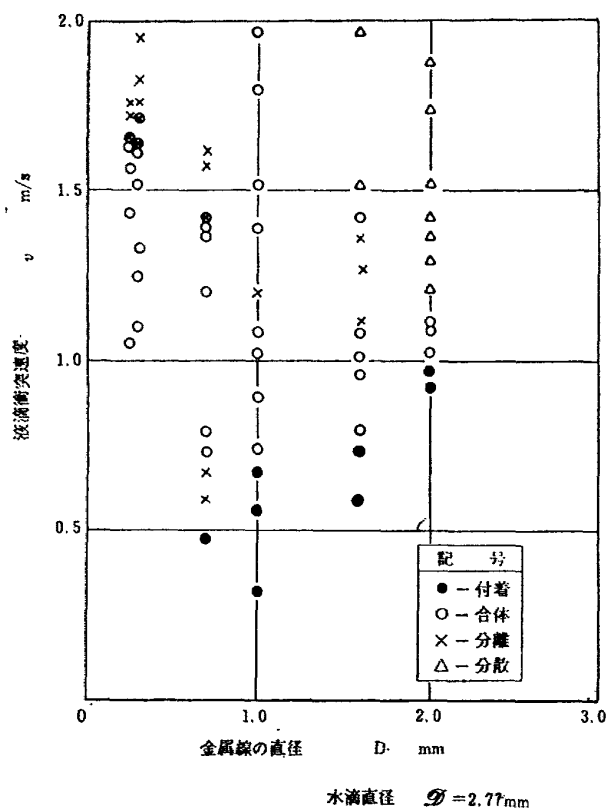


図 14 水滴直径一定の場合の衝突状態図

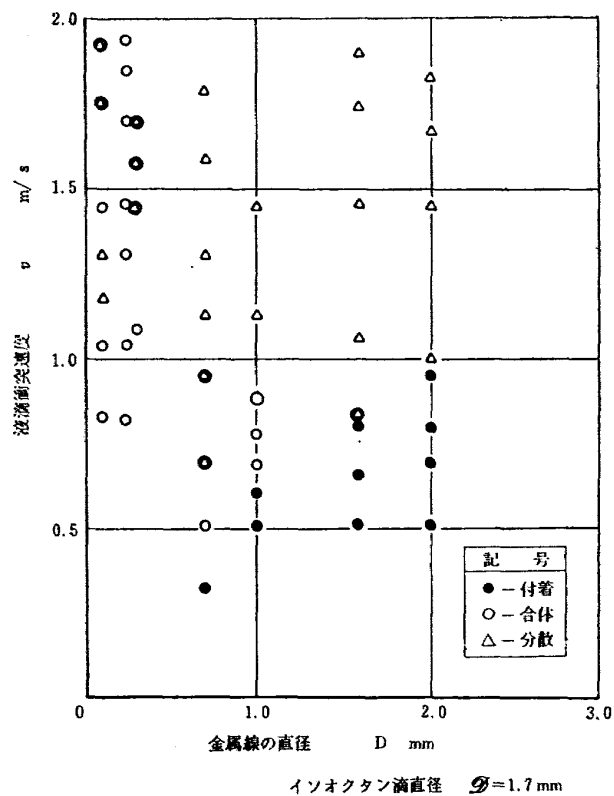


図 16 イソオクタン液滴直径一定の場合の衝突状態図

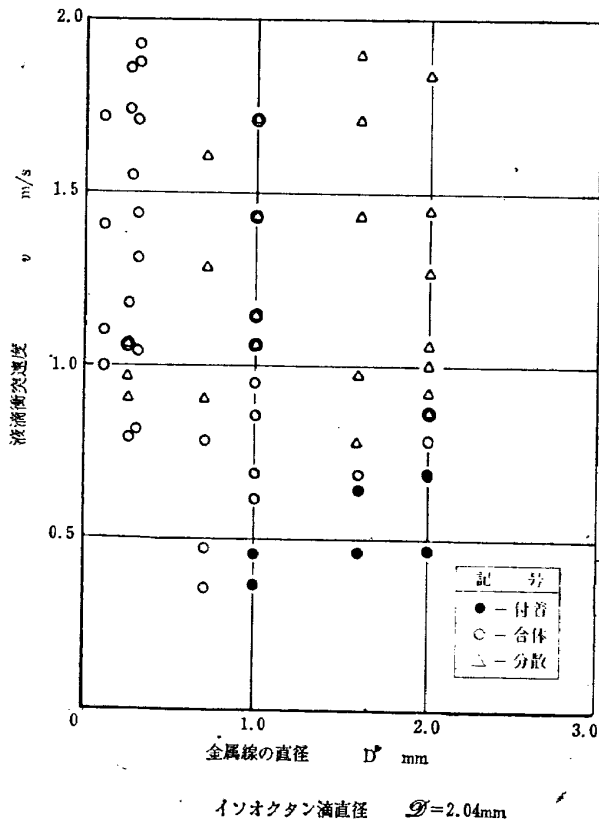


図 17 イソオクタン液滴直径一定の場合の衝突状態図

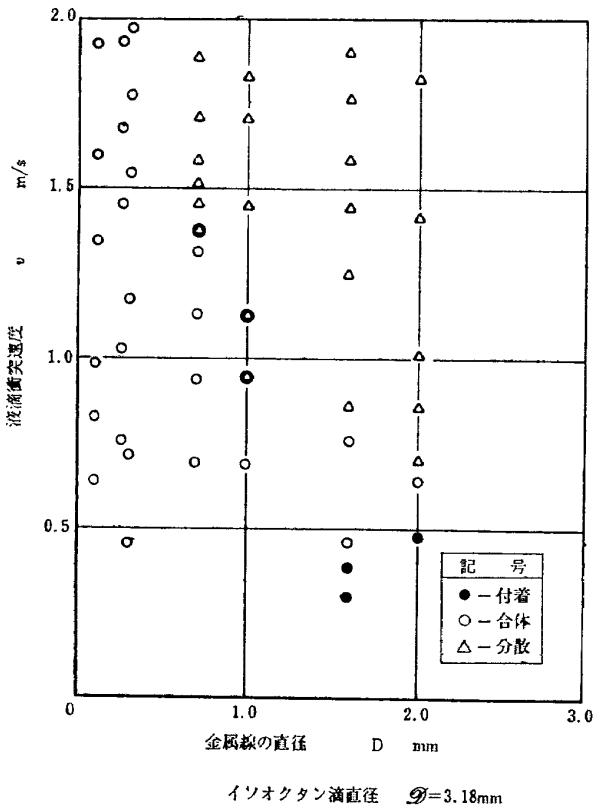


図 18 イソオクタン液滴直径一定の場合の衝突状態図

なお、⊗, ⊕ などの印は、合体と分離、合体と分散などの遷移的狀態で、区別の明確にしかねる場合を示した。

図 16 から図 18 はそれぞれイソオクタン液滴の直径 1.7 mm, 2.04 mm, 3.18 mm の衝突の場合を示したものである。

これらの図において、水の場合との著しい相違は、分離現象が現われないことである。分離に相当する条件では分散がおきる。表面張力が非常に小さいことに原因があると思われる。

4.4 金属線を加熱した場合

金属線の温度を 20°C~230°C の範囲で変え、他の実験条件は一定の状態で観察した。温度は 10°C ずつ段階的に上げ、その都度定常温度の状態で観察した。

水の場合は、金属線の温度が 100°C まではほとんど常温の現象と同じである。

金属線温度が 100°C 以上の場合について、分散のおきる場合についてみると次のようになる。

それまで金属線表面に残存付着する余滴が、線の上、側面、下部とまちまちであったものが、100°C 以上の場合には線の下部に付着することが多くなり、また衝突後、いくばくかの時間遅れをみせた後、蒸気を発生する。

金属線温度が 130°C では付着した液が沸とうするのが観察され、それ以上の温度になるとその沸とう現象はますます激しくなる。(図 19-(a))

165°C 付近では、蒸気のほかに非常に微細化した液滴飛沫が現われる。(図 19-(b))

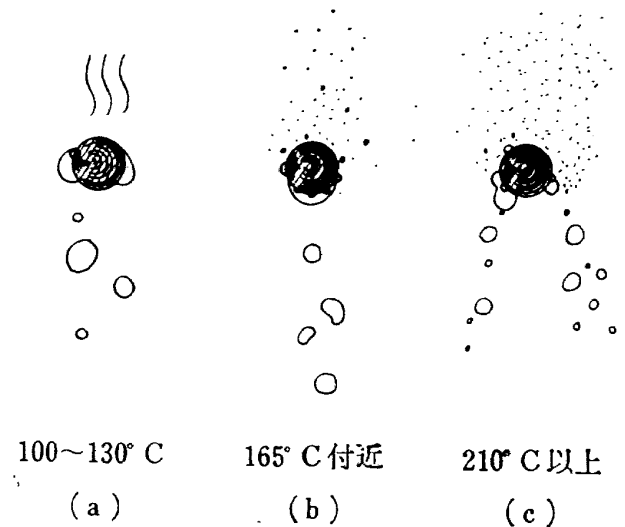


図 19 水滴が常温~230°C の金属線に衝突したときの状態 (D=3.2 mm, ϕ =3.68 mm, v=1.36 m/s)

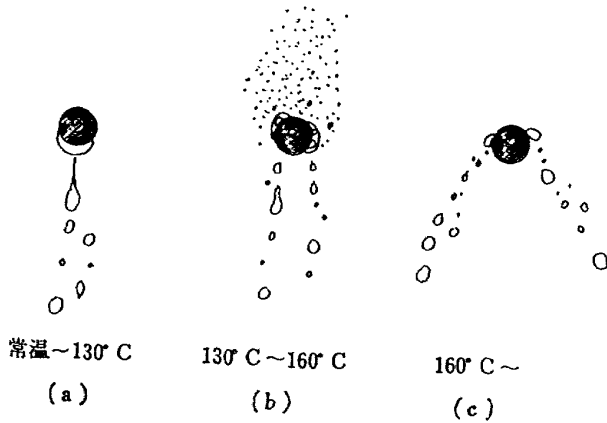


図 20 イソオクタンが加熱した金属線へ衝突したときの状態 ($D=3.2\text{ mm}$, $\mathcal{D}=3.18\text{ mm}$, $v=1.35\text{ m/s}$)

210°C では、衝突して破壊された液滴は線をまたいで二手に分かれる。(図 19-(c))

それ以上の温度では、同様の状態で激しい微粒子の飛散や、蒸発をおこなう。

イソオクタン液滴の場合も、図 20 のようにほとんど同様の変化をおこなう。

この場合には水と比較して比熱と潜熱が著しく小さいためであろうが、130°C 付近でほとんど衝突と同時に沸とうする。

150°C では核沸とう状態で、蒸気が激しく発生する。同時に非常に微細な液滴が飛散する。

160°C ではかえって蒸気発生量が少なくなり、液滴は金属線の表面を滑るように二手に分かれて分散する。液滴と加熱面間に薄い蒸気層のできるライデンフロスト現象に相当する状態である。

水の場合と比較するとこの現象は顕著である。水の場合は金属線の液滴衝突部が局部的に、また瞬間的に大きな温度降下をもたらしてしまうことがイソオクタンとの現象の相違をもたらす原因のようである。

以上の金属線の温度をあげた実験は、液滴の衝突によって金属線温度が局所的、時間的変化をおこすので温度一定の条件下で実験をすることが難しい。

厳密な結果を期待するには、さらに特殊の実験技術が必要とする。

5. 無次元パラメータによる整理

液滴の金属線への衝突状態が個々の液滴直径にたいして図 13~図 15, あるいは図 16~図 18 のように表わされたが、これらを無次元パラメータによって整理してみよう。

4.1 に述べたような種類の現象がおきるが、このうち最も明確に物理的区別がつくのは付着するか否かである。

一方、合体と分離、分離と分散などの区別は、衝突によって派生する小液滴の個数, あるいはその大きさによって判断されることが多く主観的要素が入る。

そこで付着のおきる場合と、その他の現象の場合について区別して考えてみる。

5.1 付着現象の限界

金属線に液滴が付着する場合には、落下してきた液滴のもつ運動エネルギーが、すべて表面張力によって吸収されるものと考えられる。後者の力は、図 21 のように液滴直径と金属線直径に比例するものとする、次のように表わすことができる。

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_d \pi \mathcal{D}^3}{6} v^2 = K' \sigma \mathcal{D} D \quad (1)$$

ここで、 K' は比例定数である。さらに定数をまとめると、

$$K = \left(\frac{\rho_d \mathcal{D} v^2}{\sigma} \right) \left(\frac{\mathcal{D}}{D} \right) \quad (2)$$

ここに、 $\rho_d \mathcal{D} v^2 / \sigma$ は液滴の破壊現象などのさい、しばしば説明に用いられるウェーバ数に類似の無次元数である。これを液滴ウェーバ数と名付け W_{ed} と記号する。

式 (2) の右辺の二つの無次元数によって、水滴およびイソオクタン液滴のデータを整理してみると、それぞれ図 22, 図 23 のようになる。

両図において破線は実験点の分布からほぼ妥当と判別される付着の限界線である。

一方、同図において実線は上の解析から求めた関係 (2) にもとづいて引いた付着の限界線である。

水の場合にはかなり良い一致がみられる。その場合 (2) の定数は

$$K=50$$

である。

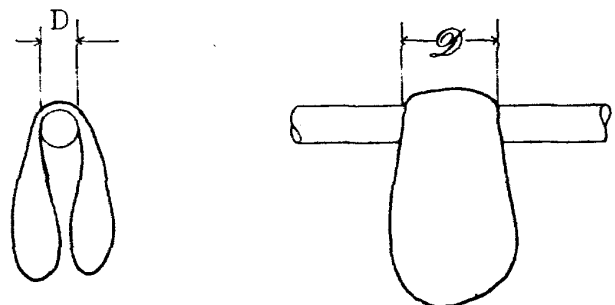


図 21 金属線へ衝突した液滴

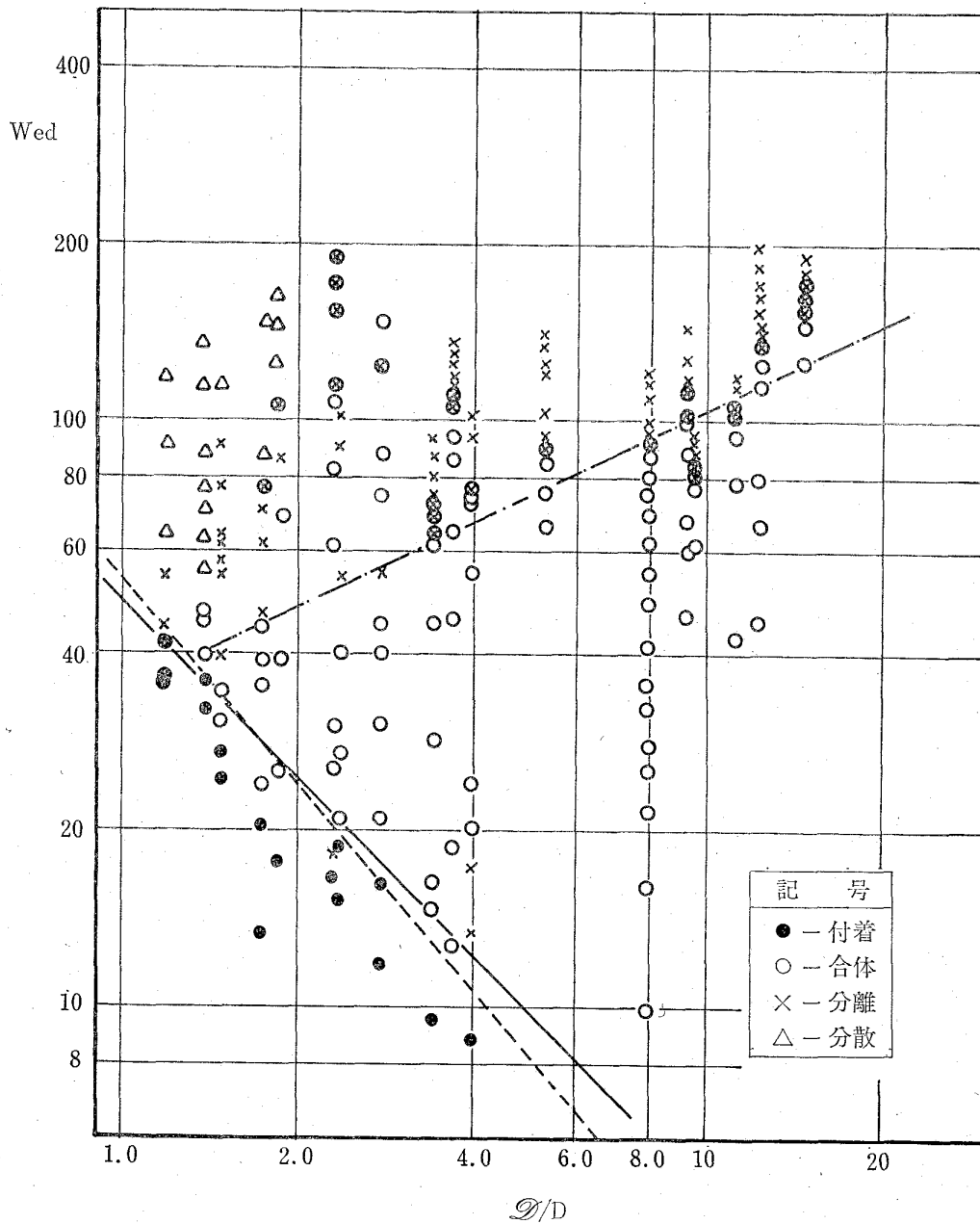


図 22 水滴の金属線への衝突状態図

一方、イソオクタンの場合、

$$K=43$$

となる。

5.2 合体と分離あるいは分散の境界

図 22 と図 23 によってわかるように、合体と分離あるいは分散の現象の境界も、 W_{ed} と D/D によっておおよそ区分されることがわかる。

図 22 よりこの境界は水の場合、

$$W_{ed}=34\left(\frac{D}{D}\right)^{0.49} \quad (3)$$

である。ただし、この実験範囲は

$$1.1 < D/D < 15$$

であって、かつ付着現象のおきない場合に適用できる。

イソオクタンの場合には図 23 より、

$$W_{ed}=41\left(\frac{D}{D}\right)^{0.56} \quad (4)$$

であるが、このときは上限が存在する。

すなわち、

$$1.0 < D/D \leq 6$$

で、左の不等号のみ実験範囲を示す。

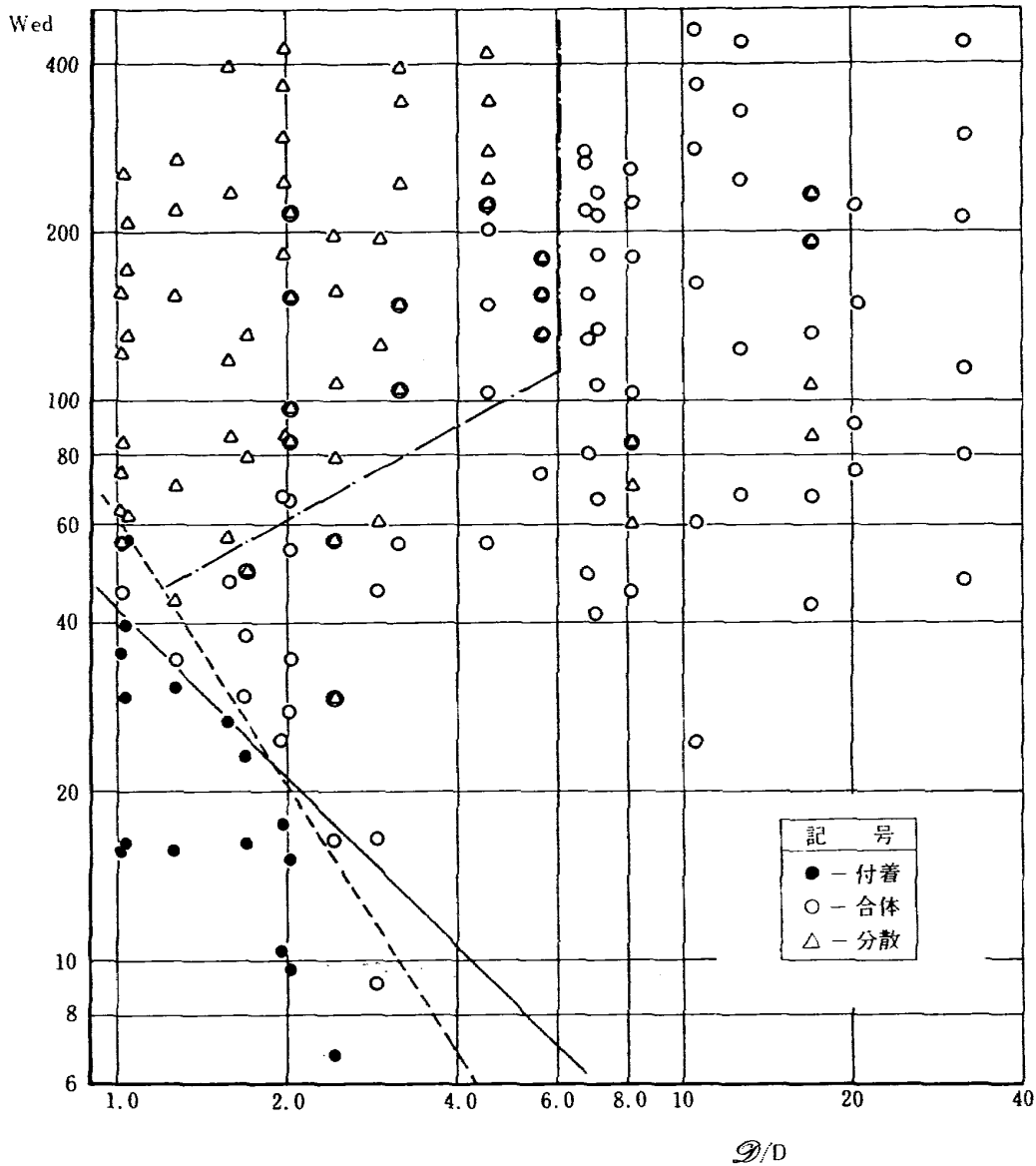


図 23 イソオクタン液滴の金属線への衝突状態図

6. 考 察

以上のように、常温の金属線へ衝突する液滴の現象は、無次元数 W_{rd} と D/D で示す状態図で整理できる結果が得られた。

実験装置の関係から、実験結果に厳密な精度を出すことができなかったが、次に述べる諸条件を考慮した実験をおこなえば、水とイソオクタンの結果が一致をみるものと考えられる。

(1) 使用金属線の表面あらさ、清浄度、および金

属線材質による「ぬれ」すなわち表面張力の問題。

- (2) 液滴が完全に乾いた金属線表面へ衝突すること。
- (3) 衝突直前の液滴は、内部流動がなく真球に近い状態であること。
- (4) 衝突のさい、液滴と金属線の中心が運動方向軸上に一致していること。

このうち (1) については、この実験で使用した金属線は特別の表面処理をしていない普通の引抜き線で

ある。また、材質についても表 2 に示すようにいくつかの種類をもちいたが、それらの材質の違いによる現象の相異が系統的にあらわれることはなかった。

厳密に言えば、使用した液体と金属との表面張力が問題になると考えられる。

(3) の影響は、図 22, 図 23 の W_{ed} の低い場合すなわち滴下口から金属線までの距離が短い場合に誤差となっている可能性が強い。滴下口から離れた液滴は、形状的に長円形のたて振動をおこなっており、液滴内部での液体の流動が考えられる。滴下口から金属線までの距離が短いとそれが十分減衰する余裕がないまま衝突する。

(4) についてもこの条件を厳密に満足させることはきわめて難しい。ことに滴下口と金属線の距離が大きい場合においてそうである。図 24 に正しく金属線の中心軸上に衝突しなかった場合を示す。この場合、本来ならば分散の現象がおきるはずであるが、このようにこわれにくくなる。

つぎに、始めに述べた応用四事例について検討してみる。

(1) 熱線風速計による気流中液滴量測定

熱線風速計の原理は、検知部の熱線から奪われる熱量を測定するものである。これには定電流型と定温度型があるが、ここでは熱線温度を任意の設定値温度に保つことができる後者の形式のものを考える対象とした。

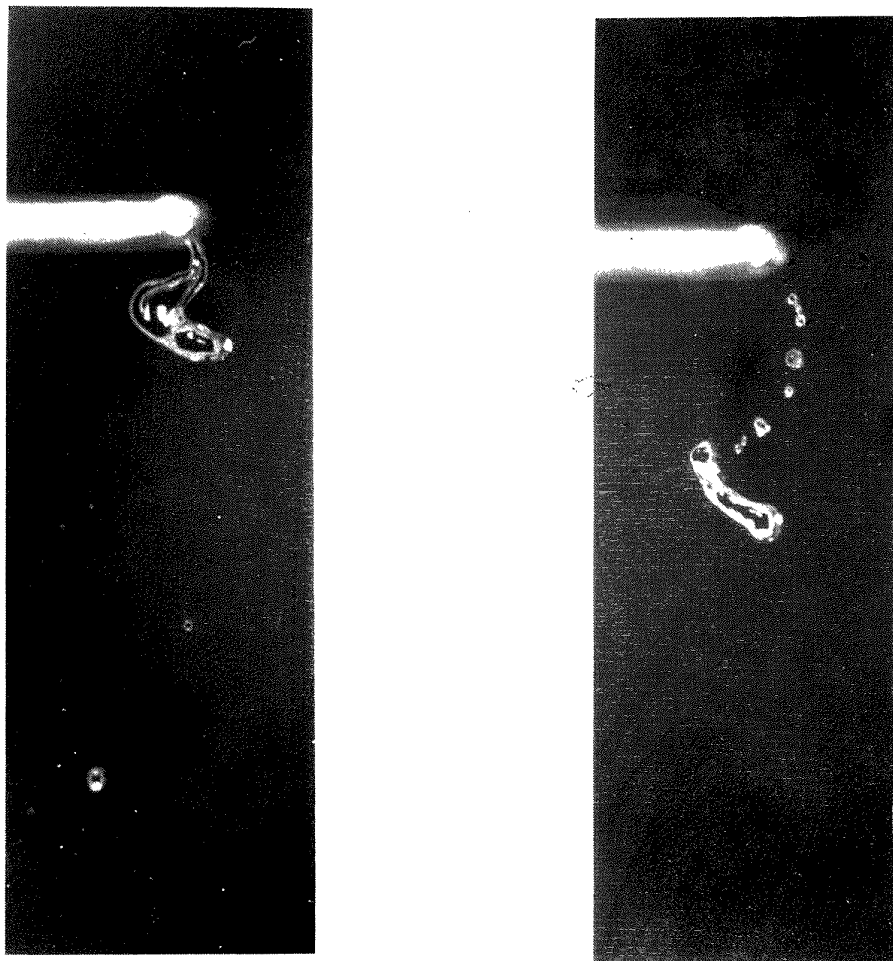
熱線温度がそれに衝突する液体の沸点以下ならば、液滴衝突状態図は常温の場合とほとんど同じと考えられる。

測定条件によっては衝突現象が 4.1 の分類のように異なるので、検知にたいする物理的違いを生ずる。

図 22, 図 23 の各領域について熱線から熱を奪う状況を検討してみると次のようになる。

(a) 付着領域

熱線に付着した液滴は予熱され、蒸発をおこなう。付着する以前に気体中にあった液滴はすでにその表面



イソオクタン; $D=2.04 \phi$, $D=1.0 \phi$, $v=1.3 \text{ m/s}$

図 24 液滴が金属線の中心に衝突しなかった場合

での蒸発のため、周囲の雰囲気温度よりかなり低い温度となっている。その液滴温度を T_d とすると、単位時間に熱線に付着する液滴量 w_{fa} を蒸発させるため必要な熱量は、

$$q = \int_{T_d}^{T_b} C_p w_{fa} dT + H_L w_{fa} \quad (5)$$

である。

熱線風速計の出力から q の値を知ることができれば熱線に衝突する液滴の量が測定できることになる。

しかし実際には、燃料液滴は種々の炭化水素化合物の混合物質であることが多く、物性的には簡単でない。

(b) 合体、分離、分散領域

合体、分離、分散のいずれの場合にも短時間だけ液滴は金属線と接触している。

測定しようとする液体につき We_d と D/D の条件がある値のときは、液滴の形態的な変化は一定と考えられるが、熱線と液滴との接触時間、接触面積、熱伝達などについてはさらに検討しなければならない。

以上のように付着現象のおきる場合と、それ以外の場合では、熱線へおよぼす影響が物理的に著しく異なっている。

上の (a), (b) の現象が同時におきるような環境下たとえば粒径範囲の広い粒群の測定などは普通の状況であるが、その場合おきる両現象の区別を熱線風速計

の出力のみから知ることはできない。したがってこの場合、この方法を実際の測定に応用することはできない。

ただし、熱線の温度をライデンフロスト現象がおきるほど上げた場合には、分散あるいは分離の現象のみが現われるので研究の余地がある。

以上のほか、実際には液滴周囲の温度変化、液滴近傍の蒸気密度、液滴の存在による気流乱れ、金属線へ正しく衝突する液滴の衝突頻度などの影響を考慮しなければならない。

(2) ウォーキングステッキ形燃料蒸発管のタービュレンスピンの効果

これは液滴をはこぶ気流速度が大きく、ピンの温度が高い条件下なので、液滴がピンに衝突すると分散あるいは分離の現象となる。

ピンに衝突する液滴はそれほど多いとは考えられないが、管の中心近くを飛ぶ液滴を破壊し、分散させ、管壁方向へ飛散させて気流中や管壁での燃料蒸発に役立つであろう。

ことに蒸発管の中心軸にそって燃料を供給した場合には、管内風速 45 m/s において供給燃料の 45% が液滴として気流中に浮遊する³⁾。この場合、管壁からの熱伝達は液滴が管壁に接触する場合とくらべて格段に少ないから、液滴流を管内中心から分散させることは重要である。

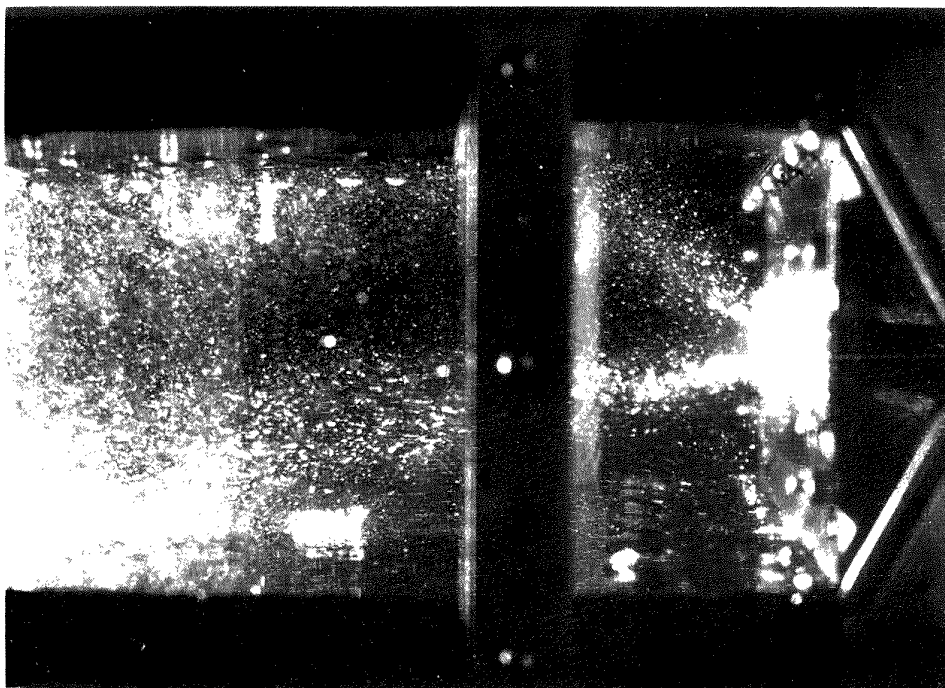


図 25 金属網によって液滴流の分散をはかった一例

(3) 熱電対への液滴の衝突

液滴が熱電対へ付着した場合には式 (5) で表わされる熱量を奪うので最も大きな冷却効果を示す。

しかし、一般に、燃焼ガスの温度測定などの場合は液滴の速度が大きい。したがって液滴ウェーバ数の値もかなり高い値なので、ある程度以上細い熱電対を使用すれば付着の領域外の条件で測定できる。

また温度の高い状態では分離あるいは分散の現象が主となるので、熱電対の上流側にカバーなどを付ければ飛んできた液滴はそれに衝突して飛び散る。

このように熱電対先端に何らかの機械的手段を講ずれば、液滴の影響が小さい測定が可能となろう。

(4) 液滴の微粒化、蒸発などの現象

液滴微粒化の観点からは、分散の現象が興味深い。

ガスタービン用蒸発形燃焼器の一形式として空気流による燃料微粒化方式 (Air-blast type) は有望であるといわれている。

しかし、その欠点のひとつに、燃料の空間的分散が悪いことがあげられる。

燃料は気流とのせん断力によって微粒化するが、多くの場合、気流と同方向にスジ状になって流れ、局部的過濃領域を形成する。

しかし、今回みた分散、ことに金属線温度が高い場合の広角度の分散現象を利用すれば、液滴の流れをある角度で広げることが可能である。

金属線の温度を高めることは、実際のガスタービン圧縮機出口温度がかなり高いことから難かしいことではない。

簡単な燃焼室模型をつかって燃料液滴を網に衝突させ、微粒化と分散をはかった例を図 25 に示す。図の右方から一直線に筋のように見えるのが 1 mm の直径のノズルから噴出した燃料の流れで、垂直に設置した網に衝突してはじめて広がり、燃焼室内に液滴が分散する。

その広がり角度、最適の網目などについてはさらに実験を要する問題である。

7. ま と め

液滴が金属線に衝突するさいの現象を実験的に考察し、この種の実験の研究や応用への問題点を指摘した。

(1) 金属線が常温の場合、液滴がそれに衝突して

おきる現象は、付着、合体、分離、および分散に大別できる。ただし、イソオクタンの場合は分離に相当する現象はない。それらの現象は無次元数の W_{ed} と液滴-線径比によって状態図にえがける。

(2) 液滴が金属線に付着する限界は、

$$K = \frac{\rho_d v^2 D}{\sigma} \cdot \frac{D}{D}$$

で表わされる。これより右辺の値が大きくなる場合には付着しない。

K の値は今回の実験では水、イソオクタンにつきそれぞれ、50、43 であった。

(3) 金属線温度を高めた場合は、それが液体の沸点以下であれば、常温の金属線にたいする現象とあまり変わらない。金属線温度が液体の沸点以上であると、金属線に付着した、あるいは残留した液滴の沸とう蒸発が盛んになる。また、さらに高温になると、金属線を濡らさなくなるライデンフロスト現象がおき、液滴は顕著な分散現象を呈す。

(4) 熱線風速計を気流中に浮遊する液滴量測定に応用するには問題が多い。細い加熱線へ液滴が衝突する現象のさらに精密な研究が必要である。

(5) 液滴の分散、微粒化が金属線、または網によっておこなえることは、応用面から興味深い点がある。

装置の製作ならびに実験はおもに東海大学学生 (当時) の海野一麻呂、池田義郎両君がおこなった。ここに謝意を表わす。

また使用した定温度型熱線風速計は計測部、松島弘一技官の厚意により借用した。

文 献

- 1) P. Eisenklam, S.A. Arunachalam, J.A. Weston; Evaporation Rates and Drag Resistance of Burning Drops, Eleventh Symp. on Combustion (1967) pp. 715-728
- 2) R.J. Priem, G.L. Borman, M.M. El Wakil, O.A. Uyehara, and P.S. Myers; Experimental and Calculated Histories of Vaporizing Fuel Drops. NACA TN 3988 (1955)
- 3) 鈴木邦男, 田丸 卓, 乙幡安雄; 燃料蒸発管に関する研究 (II) — 加熱蒸発管の燃料未蒸発分捕集 —, 航技研資料 TM-161 (昭和 44 年)

付 録 A

金属線へ衝突する液滴の速度 v は真空中を自由落下するものとしてその高さ h から次式によって計算した。

$$v = \sqrt{2gh} \quad (A-1)$$

空气中で鋼体球が自由落下するときには、空気抵抗および浮力の作用を受ける。その両者の影響を加味して計算をおこなうと次のようになる。

まず、鉛直方向の運動方程式は、

$$\rho_a \frac{\pi \mathcal{D}^3}{6} \frac{dv}{d\tau} = \rho_a \frac{\pi \mathcal{D}^3}{6} g - \rho_a \frac{\pi \mathcal{D}^3}{6} g - R \quad (A-2)$$

である。この式において、右辺第二項は空気による浮力であり、第三項は空気による抵抗である。

ここに

$$R = C_D \frac{\pi}{8} \mathcal{D}^2 \rho_a v^2 \quad (A-3)$$

である。この中の抵抗係数 C_D はレイノルズ数の関数であるが、そのレイノルズ数の速度は近似的に(A-1)による値をつかった。

すなわち、

$$Re = \frac{\mathcal{D}v}{\nu} = \frac{\mathcal{D}\sqrt{2gh}}{\nu} \quad (A-4)$$

このレイノルズ数の値は、10 cm から 20 cm の高さから液滴を落としたとき 50~500 の範囲内にある。

そこで $Re=2\sim 500$ の間で適用できる次式をもちいた。

$$C_D = 18.5/Re^{3/5} \quad (A-5)$$

(A-2), (A-3) をまとめて整理すると、

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{\rho_a - \rho_a}{\rho_a} g - \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_a}{\rho_a \mathcal{D}} v^2 \quad (A-6)$$

ここで、

$$a^2 = \frac{3}{4} \frac{C_D}{\mathcal{D}} \frac{\rho_a}{\rho_a}, \quad b^2 = \frac{\rho_a - \rho_a}{\rho_a} g \quad (A-7)$$

とにおいて (A-6) をまとめると、

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{1}{a^2} \left(v^2 - \frac{b^2}{a^2} \right) \quad (A-8)$$

この式において、 $v=b/a$ で最終速度 (terminal velocity) となるが、本実験の最大落下距離は、0.2 m 程度であるから計算によると $v < b/a$ の場合だけについて考えて十分である。

(A-8) を積分すると、

$$\left(\frac{b}{a} + v \right) \left/ \left(\frac{b}{a} - v \right) \right. = c_1 e^{2ab\tau} \quad (A-9)$$

積分定数 c_1 は境界条件 ($\tau=0$; $v=0$) より求め、落下時間 τ における速度は、

$$v = \frac{b}{a} \left(\frac{e^{2ab\tau} - 1}{e^{2ab\tau} + 1} \right) \quad (A-10)$$

落下距離 h はこれをさらに積分して次のように求める。

$$h = \frac{1}{2a^2} [\ln \{ (e^{2ab\tau} + e^{-2ab\tau} + 2) / 4 \}] \quad (A-11)$$

TM-168	ダンピングメータの試作	1970年2月	柳沢三憲
TM-169	ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの測定 (I)	1970年2月	相波哲朗
TM-170	JRエンジンの燃焼器におきた振動燃焼	1970年2月	鈴木邦男, 石井浅五郎 山中国雅
TM-171	缶形燃焼器 (低圧, 低温系) 試験設備による航空計器の水結 (着氷) 試験	1970年3月	鈴木邦男, 相波哲朗 本間幸吉, 服部宣夫
TM-172	自動追尾型風向風速測定器	1970年3月	川幡長勝, 中谷輝臣
TM-173	FA-200 改機の動安定微係数	1970年4月	遠藤浩, 林良生 海老沼幸成, 中谷輝臣
TM-174	遷音速風洞動安定測定装置の構造と作動	1970年4月	小橋安次郎, 河野長正 西武徳, 宮沢政文
TM-175	NAL-16・31D型ロケットの研究試作	1970年5月	五代富文, 近藤洋史 中井暎一, 田畑浄治
TM-176	非対称自由流線の計算法	1970年5月	高橋 侖
TM-177	小型固体ロケットモータの振動燃焼実験—パルス法による中周波振動燃焼の研究—	1970年5月	五代富文, 伊藤克弥 西村久男, 湯沢克宜 柴藤 羊二
TM-178	大型低速風洞動安定微係数測定装置	1970年5月	広岡貫一, 遠藤浩 戸田亘洋, 岡部祐二郎
TM-179	風洞天秤の試作	1970年5月	金成正好, 北出大三
TM-180	ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの測定 (II) —レーザのドップラ効果を利用する方法—	1970年5月	相波哲朗
TM-181	航空機の乗り心地について	1970年6月	幸尾治朗
TM-182	排気系障害板の模型実験	1970年 月	田辺義一
TM-183	ロケット模型の大型低速風洞試験	1970年9月	近藤洋史, 高橋 宏 桑野 尚明

注: 欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料184号

昭和45年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)44-9171(代表) ☎182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2~27~12

