

微小液滴同士の衝突*¹

— 衝突現象の観察 —

古山 幹雄*², 弓野 誠*³

COLLISION OF TWO DROPLETS — OBSERVATION OF PHENOMENON —

Mikio FURUYAMA and Makoto YUMINO

This experimental study describes collision of two minute droplets. Generation of a small droplet took out by use of a piezoelectric diaphragm. A generated droplet had the mean equivalent diameter of about 0.5 mm, and its speed was ranged from 1 to 2.4m/s. They could be changed by supply of DC voltage and single-shot pulse width to piezoelectric diaphragm. Two droplets were made a head-on collision in ambient atmosphere. The collision of droplets showed various behavior.

Key Words : Droplet, Collision, Breakup, Atomization

1. 緒 言

ガソリン噴射の微粒化特性において噴霧の平均粒径が噴霧下流で増加する傾向にあるといわれている⁽¹⁾。これは生成された微小液滴同士が非定常噴霧中において追突などを含めて衝突および合体・再分裂する現象があるためと考えられる。本研究はこの噴霧中の微小液滴同士の衝突及びその後の挙動特性を調べようと微小液滴を同時に二つ発生させて衝突させることを試みた実験的研究である。これにより噴霧の生成および微粒化機構解明の一助になればと考えてい

る。またこの応用は噴霧の衝突（燃焼）の研究にも使えるものと期待している。

単一微小液滴発生装置の性能として任意の液滴径，衝突速度，衝突方向などを変えられることができるものを考えた。また供試液体を変えた実験も行った。本論文はこれらの実験条件について一通り実験した結果について述べられたものである。実験条件の範囲がまだ狭いが今回の実験結果では著者らが予想していなかった衝突後の挙動もあり興味ある結果が得られた。今後はさらに多くの条件について衝突実験を行い微小液滴衝突について確かな概念を得たいと計画している。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の概略を示す。装置は微

* 1 1995年5月23日原稿受付
* 2 千葉大学工学部
* 3 千葉大学大学院
〒263 千葉市稲毛区弥生町1-33
TEL 043-290-3181

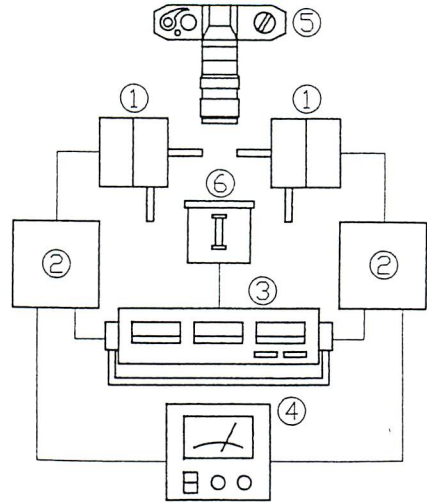
小液滴発生装置, シングルショット回路, 遅延器, 直流電源, そして写真撮影装置で構成されている。

微小液滴発生装置には次に示す実験項目を考えて設計製作した。

- (1) 単一液滴が発生する。
- (2) 液滴径が変えられる ($< 500 \mu\text{m}$)。
- (3) 発生時期を正確に設定できる。
- (4) 初速度が変えられる。
- (5) 液滴の発生に再現性がある。
- (6) 任意の方向に発射できる。
- (7) 液体性状が変えられる。

以上の項目の他に将来は雰囲気や液滴の温度, 雰囲気圧力などもパラメータに加える予定である。

微小液滴発生装置の断面図を図2に示す。二つに分かれる黄銅製函体で, 図示した下側の函体には圧電振動板 (他励振型ピエゾ式, 7BB-20-6, 共振周波数 $6.3 \pm 0.6 \text{ kHz}$, 外径20 mm, 村田製作所製) がゴムパッキン (厚さ2 mm) を介して固定されている。振動板の上部に高さ4 mm, 径22 mmの空間があり, この空間に液体が満たされる。上側函体には横方向からガラス毛細管 (内径0.8 mm) が挿入され液体がシリンジを使って供給される。上側函体中央に前述と同径のガラス管が立てられ, 管先端から液滴が発生する。このガラス管の先端は先細状ノズルになっている。このノズルの加工はガスバーナーを使って行われた。本実験では $78 \mu\text{m}$ と $85 \mu\text{m}$ の内径のノズルが使われた。再現性のある液滴を得るためには液室内の内圧を安定させ, ノズル先端における液面状態を一定に保つことが重要である。このために液体供給用シリンジのピストンの位置で調整



- ① 微小液滴形成装置
- ② シングルショット回路
- ③ PULS DELAY GENERATOR
- ④ DC 0 ~ 110V 電源
- ⑤ 35mmカメラ ⑥ フラッシュ

図1 実験装置の概略

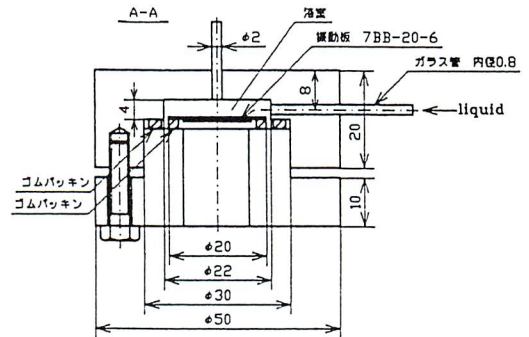


図2 微小液滴発生装置

表1 供試液体の物性値 (298 K, 101 kPa)

	メタノール	ガソリン*
密度 (kg/m^3)	787	660~750
動粘度 (mm^2/s)	0.705	0.5~0.6
表面張力 (mN/m)	22.55	20

*ただし, ガソリンは標準的なものの値とする

した。

供試液体はガソリンとメタノールを使用した。これらの主な物性値を表1に示す。雰囲気温度および供試液体の液温は室温とし、大気圧下で実験を行った。

圧電振動板にパルス状電圧を供給するのがシングルショット回路と直流電源である。図3にシングルショット回路図を示す。回路は遅延器からの入力信号を TTL IC (74121) を用いて任意のパルス幅のシングルショット信号に変換し、そのパルス幅分の時間だけスイッチング回路 (2SC627F) を閉じることにより振動板を駆動させるための直流電圧の入力の制御を行う。スイッチング回路を閉じるためのパルス幅は半固定可変抵抗により0.4~7ms間で任意に設定できる。供給電圧は0~110V間で変えられる。設計時の予想ではパルス幅で液滴径を、供給電圧値で液滴速度を変えたいと考えた。

スイッチング回路内の抵抗値を変えることにより振動板への印加電圧の波形に変化が現われる。図4に抵抗値による電圧波形の変化を示す。予備実験により、電圧の立ち上がりを急激にして規定の電圧まで早く電圧を上げ、その分パルス幅を小さくするほうが後述する主液滴後方に発生する余滴群が発生しにくくなることが判明した。その結果スイッチング回路内の抵抗値は8.2kΩとした。

液滴の撮影はカメラ(105mmマクロレンズ+接写リング)とフラッシュ光(PS-240, 菅原製)を使って瞬間写真を撮影した。二台の微小液滴発生装置は複写用スタンドに微動雲台または自由雲台を介して固定されている。液滴の発射方向とその微調整には雲

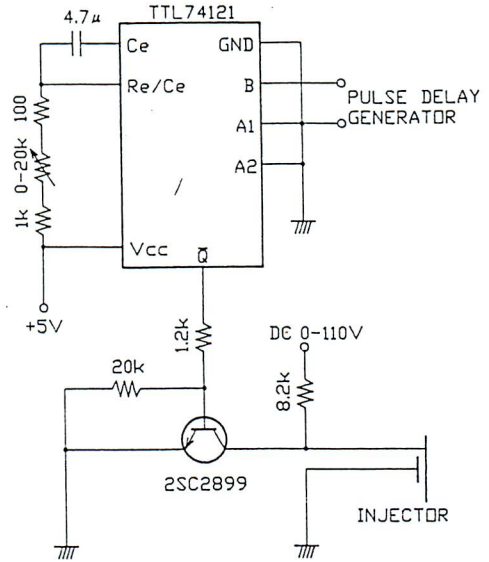


図3 シングルショット回路

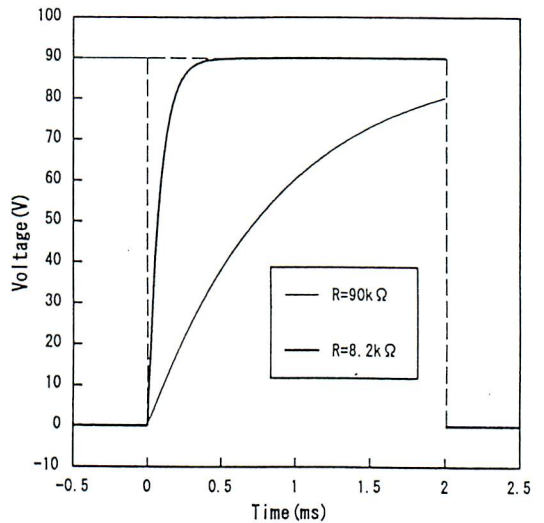


図4 抵抗値による電圧波形の変化

台の粗動および微動装置を用いた。

遅延器にトリガー信号が入力された後、それぞれに設定した遅れ時間を与えて、ch 1およびch 2からは各シングルショット回路へ、ch 3からはフラッシュコントロールユニットへ信号が出力される。シングルショッ

ト回路への信号の遅れ時間の設定で液滴を空中の一点で衝突するように制御し、フラッシュコントロールユニットへの信号の遅れ時間の設定により液滴の時系列変化を観察した。

3. 実験結果および考察

3. 1 液滴軌道の予測

実験の前段階として液滴の軌道計算を行い、液滴発射時のパラメータが軌道に与える影響を加味し、二台の発射装置の距離や位置精度について考察した。

田中⁽²⁾らによると重力場における*i*液滴の運動方程式は次の式で表わされる。

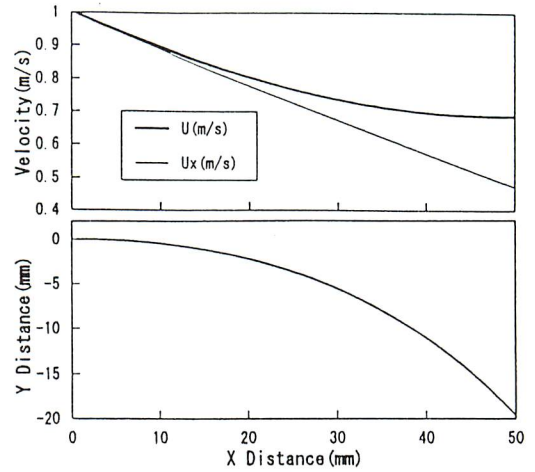
$$\rho_L \left(\frac{\pi D_i^3}{6} \right) \frac{du_y}{dt} = \rho_L \left(\frac{\pi D_i^3}{6} \right) g - C_D \times \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) \left(\frac{\rho_m u^2}{2} \right) \cos \theta \quad (1)$$

$$\rho_L \left(\frac{\pi D_i^3}{6} \right) \frac{du_x}{dt} = - C_D \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) \times \left(\frac{\rho_m u^2}{2} \right) \sin \theta \quad (2)$$

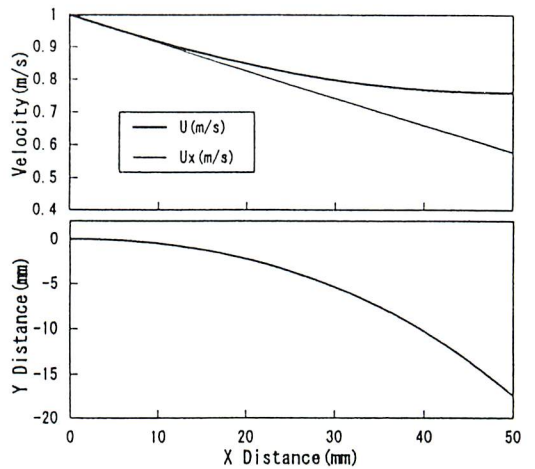
ただし、 $u_x = u \sin \theta$ 、 $u_y = u \cos \theta$ 、 $u^2 = u_x^2 + u_y^2$

ここで、 D_i ：液滴の直径、 ρ_L ：液滴の密度、 ρ_m ：雰囲気密度、 μ_m ：雰囲気粘度、 θ ：液滴の初期発射方向（水平）に対する進行方向角（下向きが負）。また、 u_x 、 u_y はx軸およびy軸方向の液滴速度（ $u_x = dx/dt$ 、 $u_y = dy/dt$ ）を表わす。 C_D は液滴の抵抗係数で、便宜上三つのRe数（ $Re = \rho_m u D_i / \mu_m$ ）領域に分けられ以下のように与えられる。

$$Re < 2 \quad (3)$$



(a) $D_i = 300 \mu m$



(b) $D_i = 350 \mu m$

図5 計算による液滴の軌道

表2 軌道計算結果（ $X = 10 \text{ mm}$ ）

	$D_i = 300 \mu m$	$D_i = 350 \mu m$
Y	0.52 mm	0.52 mm
dt	0.01 ms	0.01 ms
T	10.61 ms	10.47 ms
u_x	0.886 m/s	0.911 m/s
u_y	0.098 m/s	0.098 m/s
u	0.892 m/s	0.916 m/s
θ	-6.3°	-6.1°

$$2 \leq Re \leq 105 \quad (4)$$

$$500 < Re \leq 105 \quad (5)$$

式 (1), (2) を解析的に解くことは困難であるため, 以下の式に変形して逐次近似法によって数値計算出来ることを示している. 本研究でもこれらの式を使って液滴の軌道を計算した

$$\Delta u_y = \left\{ g - \frac{3 \rho_m}{4 \rho_L D_i} C_D u u_y \right\} \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta u_x = - \left(\frac{3 \rho_m}{4 \rho_L D_i} \right) C_D u_x \Delta t \quad (7)$$

図5に計算結果を示す. ここでは液滴の物性値をメタノールのものとし, 雰囲気流体は空気, 大気圧下の条件で計算を行った. 同図 (a) [$D_i = 300 \mu\text{m}$] で, 液滴は $X = 10 \text{ mm}$ 付近から Y 軸速度成分が大きくなる. 同図 (b) の結果から, 液滴の直径が大きくなることによって空気抵抗の影響が受けにくくなっていることが分かる. しかしこれも $X = 10 \text{ mm}$ 付近においては (a), (b) 間の軌道のずれは非常に小さいことから, ノズルとノズル間はこの値以下であれば衝突のばらつきをある程度抑えることができると考えられる. 実際の実験において, 飛距離が増せば外的要因による影響が大きくなることからノズル間の距離は小さいほうがよい. 表2に $X = 10 \text{ mm}$ における計算値を示す.

実験モデルでは Re 数は15~25程度であったが, 液滴の直径または速度がさらに小さい領域 ($Re < 2$) では計算上から, 雰囲気流体の密度を小さく (圧力を下げる) しても空気抵抗が変わらないことが分かる.

3. 2 発生液滴の特性

図6に形成されたメタノール液滴の飛行中の写真を示す. 図中の T は振動板へのパルス入力開始時からの遅れ時間を示す. $T = 2.0 \text{ ms}$, 液滴発生初期ではガラスノズルから飛び出した主液滴とノズル先端との間に細い棒状の液体が繋がっているのが分かる. またこの時期の主液滴の形状は進行方向に長く, 表面にも凹凸がある形をしている. また高速ビデオによる観察から飛行中の主液滴は表面張力により球形に復元しようとするため進行方向に対して伸縮運動を繰り返していることが分かった. $T = 4.0 \text{ ms}$ では棒状の部分は数個の小さな液滴 (余滴) に分裂し, 大きな主液滴と同軸上を並んで進行する. これら主液滴後方の余

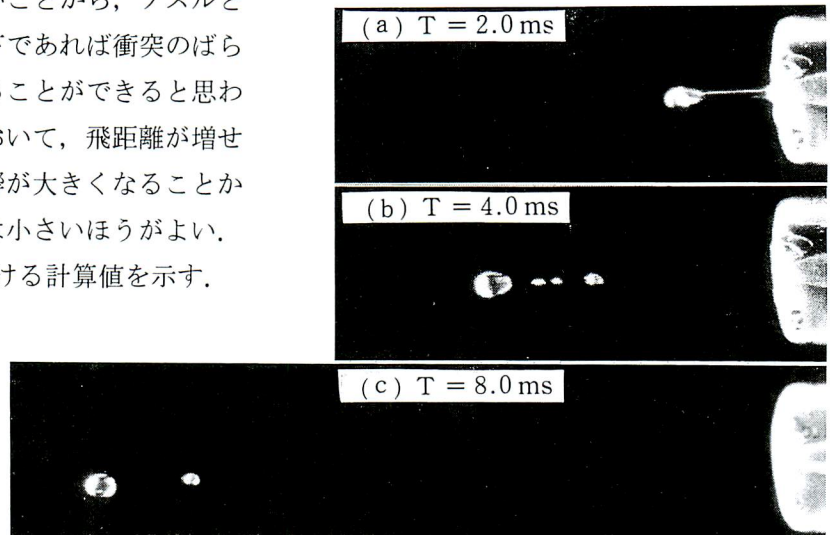


図6 液滴の発生代表例

滴の挙動は液滴発生条件により、余滴同士の追突、合体が生じたり、余滴が主液滴に追突して合体する場合なども確認された。 $T = 8.0 \text{ ms}$ では発生した液滴は球形に近い形になる。余滴の発生は著者が本実験装置で望んでいる性能ではないため今後装置の改良と実験技術の向上で単一球形液滴のみが発生するよう努力している。最も大きく影響するのは前述した発射直前のノズル先端の液面状態である。

次に印加電圧、パルス幅と発生液滴特性との関係を調べた。図7は供給直流電圧を変えた場合の液滴の飛距離特性を示した図である。近似直線の傾きが飛しょう速度に相当し、70 Vで0.6 m/s, 90 Vで1.2 m/s, 110 Vで1.6 m/sと電圧の増加にともなって速度が大きくなっている。それぞれの電圧値における主液滴の平均形状寸法（図中のdは写真上における液滴の直径×長さのそれぞれの測定値（平均））を記入した。これからわかるように電圧による液滴寸法の変化は比較的少ない。

図8はパルス幅が飛距離に影響するようすを示した図である。パルス幅0.5 msで速度は0.9 m/s, 1 msで1.2 m/s, 1.5 msで1.1 m/sとなり、パルス幅が飛しょう速度に与える影響は比較的小さい。また、パルス幅を大きくすると主液滴の平均形状寸法は大きくなるが、それにもなって余滴群の発生が観察された。

3. 3 衝突実験

(1) メタノール液滴の衝突

図9はメタノール液滴の正面衝突の代表写真を示す。それぞれの液滴の平均形状寸法は同じで、約 $\phi 250 \times 350 \mu\text{m}$ 、飛しょう

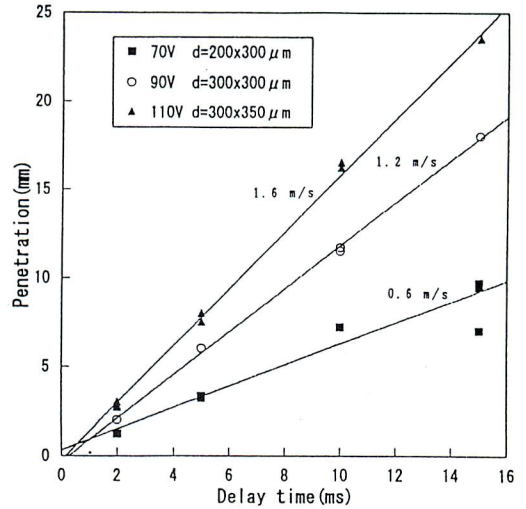


図7 印加電圧による液滴速度の変化

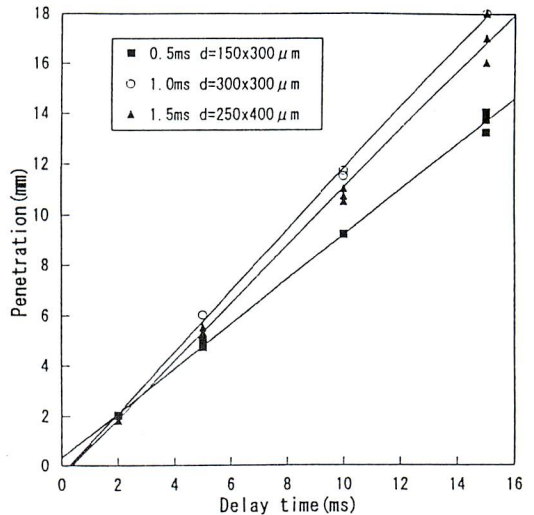
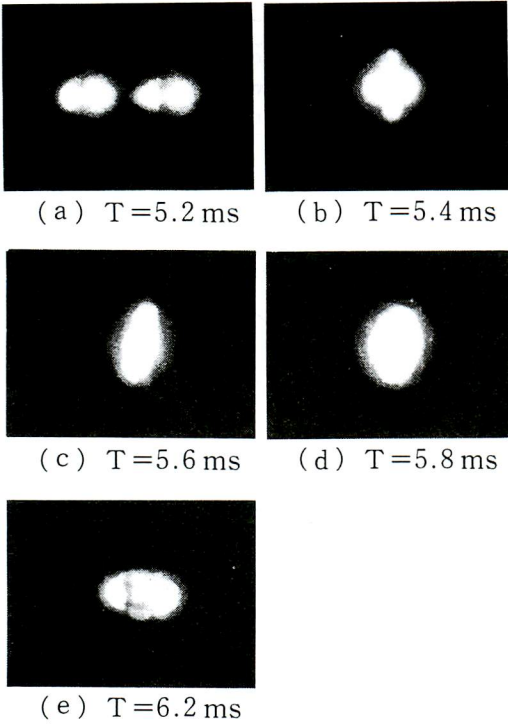


図8 パルス幅による液滴速度の変化

速度はともに約1.2m/sである。衝突によって液滴の接触部分で衝突軸と90°の方向に円盤状に広がるように変形をし始め（同図(b)）、この変形は衝突した二個の液滴が縦型の円盤状に合体して終息する（同(c)）。その後衝突軸方向に再び復元するように広がる新しい変形方向が始まる（同(d)）。そ



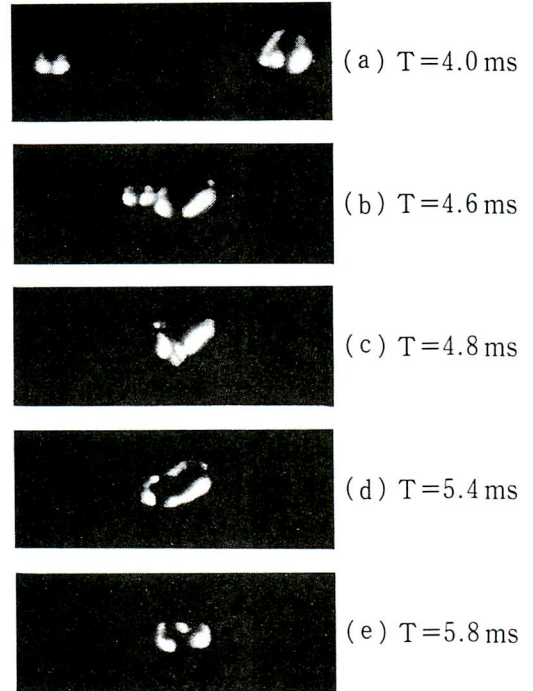
	左	右
速度	1.2 m/s	1.2 m/s
平均形状	200×350 μm	200×350 μm
パルス幅	1.0 ms	1.0 ms
印加電圧	90 V	
供試液体	メタノール	

図9 正面衝突の代表写真

して衝突前の液滴形状と相似形になった液滴状態(同(e))になった後衝突軸方向の速度成分を失って落下する。

図10は液滴の大きさが異なる場合の衝突時の代表的な写真を示す。結果的には前図と同じような合体した液滴ができるが、途中の過程は少し異なり小さい径の液滴が大きい液滴に食い込まれるように衝突するため円盤状にはならない。

図11は液滴の衝突角度(衝突直前の写真上で測定した両液滴の進行方向相対角度、正面衝突は180°とした)を125°の場合の



	左	右
速度	1.1 m/s	0.7 m/s
平均形状	150×250 μm	250×400 μm
パルス幅	0.5 ms	2.0 ms
印加電圧	90 V	
供試液体	メタノール	

図10 異径液滴の正面衝突の代表写真

代表的な写真を示す。衝突合体(同図(c))した後、衝突前のそれぞれの液滴の飛ばし方向へ分裂しようとする動きのため液滴中央部分がくびれ始める(同(d), (e))。そして左右端の主液滴とその間の余滴群に分裂する(同(f))。

(2) ガソリン液滴の衝突

図12はガソリン液滴の正面衝突の代表写真を示す。実験条件は前出のメタノール(図9)の場合と同じである。メタノールの場合と同様、合体して円盤状に変形しそして衝突軸方向に復元変形を生じるが、その後

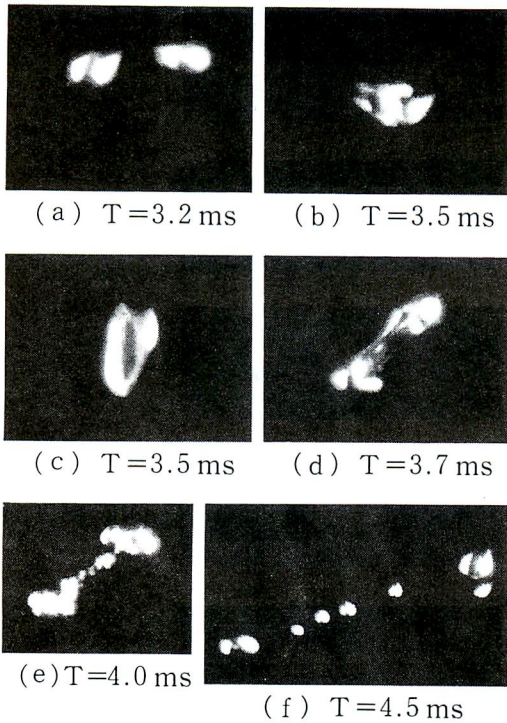


図11 衝突角度125度の代表写真

はメタノールと異なり復元の動きが持続して液滴中央部分からくびれ始め (同図 (e), (f)), くびれ部分から液滴は二つに分裂する (同 (g), (h)).

梅村⁽³⁾は燃料液滴の正面衝突挙動は次の4つの領域に分けられるとしている (図13). 衝突エネルギーがあまり大きくなく液滴の変形は小さく衝突によって液滴は容易に合体する (領域 I), 十分激しく衝突し大きな液滴変形が起こるが両液滴は衝突後跳ね返って飛びさる (領域 II), さらに衝突速度を増すと再び液滴は合体するようになる (領域

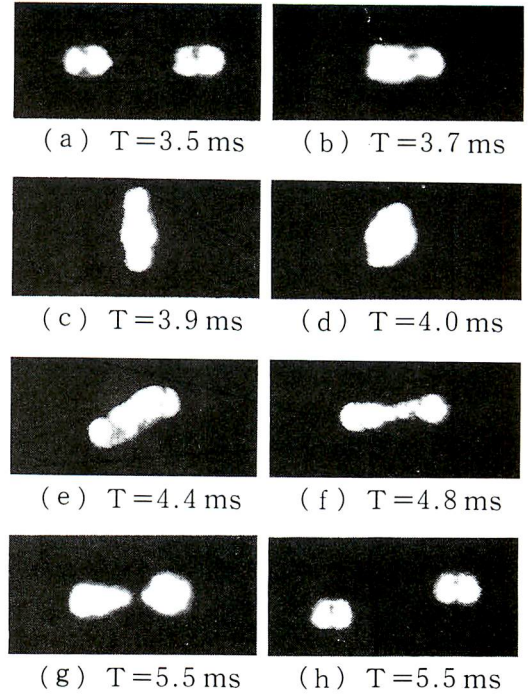


図12 正面衝突の代表写真

III), 衝突エネルギーが大きすぎ合体した液滴の表面エネルギーが液体を一つの閉曲面内にとどめておくことには不十分であって、縦長に変形したあと不安定性を起こして二個の母液滴と余滴に分裂する (領域IV). 図13中に示したプロット点は本実験結果 ($We = \rho u^2 D_i / \sigma$) である. メタノール液滴では領域IIIに当たる衝突挙動を示し, ガソリン液滴では領域IVに該当する挙動を示したが, 実験点が梅村の領域内に入らない不一致を示す. ただ We 数が同じであれば μ / ρ が小さいほど分裂しやすいという傾向に関して

	左	右
速度	2.2 m/s	2.4 m/s
平均形状	200×350 μm	200×400 μm
パルス幅	0.5 ms	0.5 ms
印加電圧	110V	
供試液体	メタノール	

	左	右
速度	1.2 m/s	1.2 m/s
平均形状	200×350 μm	200×350 μm
パルス幅	1.0 ms	1.0 ms
印加電圧	90V	
供試液体	ガソリン	

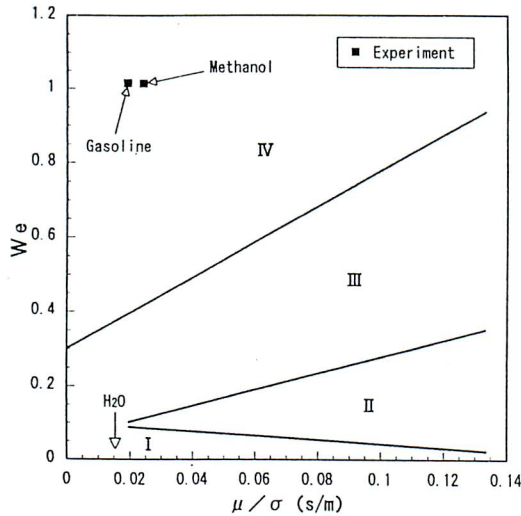
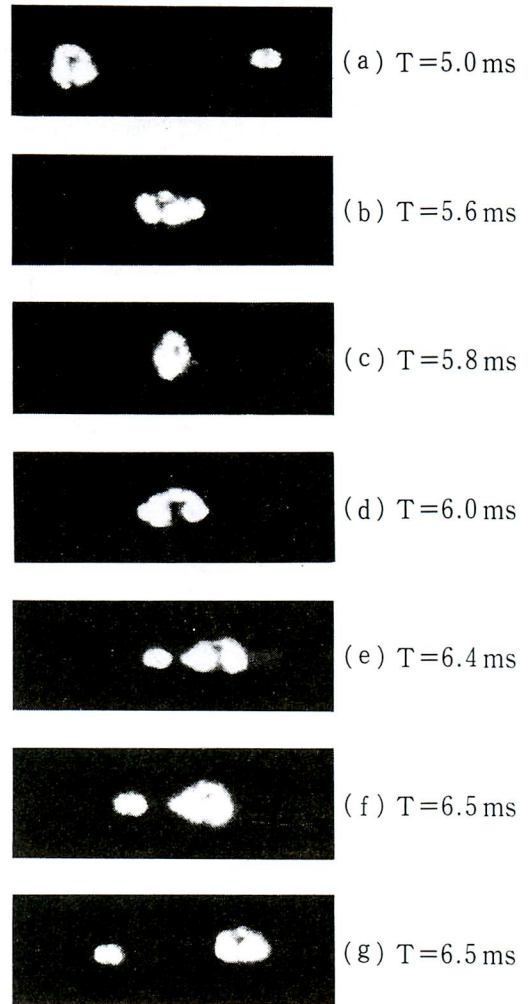


図13 正面衝突液滴挙動の物性値依存性⁽³⁾

は同様な結論を得た。

図14は大小異なる液滴寸法の正面衝突写真である。大きい方の液滴（左）は衝突合体（同図（c））後、衝突軸方向に伸び始め（同（d））、衝突部分と反対側（左側）から小さい方の液滴と同程度の大きさの液滴が一度合体した液滴から分裂する現象が生じた。これは同じ分裂でも図12で示した場合と異なる分裂法と見なせる。小液滴が大きい径の方の液滴を貫通しているとは観察されなかった。

図15は衝突角度が130° の場合の写真である。合体後（同図(c)）それぞれの液滴の進行方向に分裂する。同じ実験条件での衝突において合体後円盤状に変形して一度はくびれ始めるが球形に復元して分裂しないで合体したまま衝突角度のほぼ二等分線の延長方向に進む挙動も観察された。これは衝突時の中心位置のずれなどの精度が十分でないため少しの偏心で異なる現象が生じるかとも思われる。



	左	右
速度	1.1 m/s	1.1 m/s
平均形状	300×350 μm	150×200 μm
パルス幅	1.5 ms	0.3 ms
印加電圧	90V	
供試液体	ガソリン	

図14 異径液滴の正面衝突の代表写真

以上、種々のパラメータにおける液滴同士の衝突およびその後の挙動を示した。衝突後の挙動のパターンについては幾つかにまとめられそうであるが、今回の実験条件

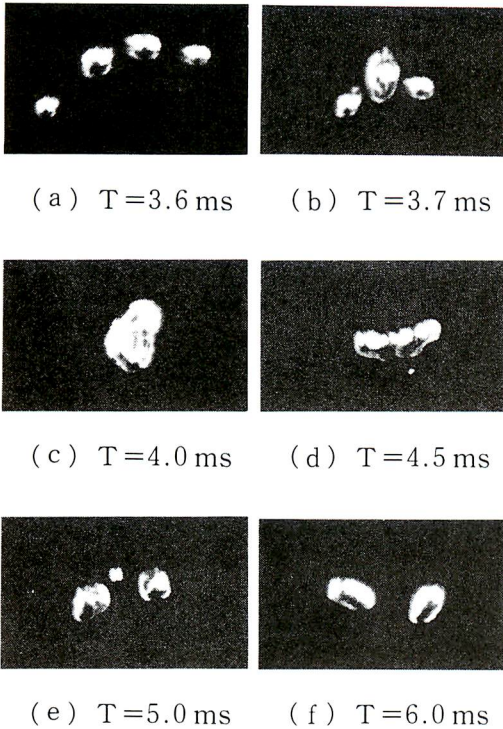


図15 衝突角度130度の代表写真

	左	右
速度	1.4 m/s	1.3 m/s
平均形状	300×350 μm	250×350 μm
パルス幅	1.0 ms	1.0 ms
印加電圧	90V	
供試液体	ガソリン	

に含まれていないより微小な液滴径，液体温度，液体性状によって新しいパターンが出てくる可能性はあると考えられる．本実験で生じたパターンについて考えると二個の液滴の持つ衝突エネルギー（運動量）の変換方法とそれに影響する液体の粘性，表面張力の大きさが関係して衝突後に生じる挙動パターンの決定を支配するように推測される．現在液滴を微小な液体粒子の集合

体と考えその個々の粒子が液体の性状と運動量の情報を持っているとした粒子形成モデル（仮称）による衝突から合体・分裂までの解析モデルを作成中でこの完成が挙動パターンについてより分かりやすい概念を提供してくれるものと期待している．

5. むすび

噴霧の中の微小液滴同士の衝突およびその後の挙動について考えようと液滴発生装置を試作し衝突させる実験を試みた．安定した微小球体状液滴の発生には今少し改良が必要であるが，微小液滴の正面および角度を持った衝突を行い合体や分裂現象を観察することができた．まだデータは少ないが衝突時の液滴の様々な形状変化を示すことが出来た．結果として，

- (1) 比較的容易に微小液滴を発生させる装置を製作し，液滴径，速度，液体性状，衝突角度などを変えた場合の衝突，合体そして分裂の様相を観察することができた．
- (2) メタノールでは正面衝突後液滴同士は合体したままであるが，ガソリンでは合体した後分裂することが分かった．また分裂方法にもいくつかの種類があることが示された．
- (3) 衝突の相対角度の違いによる衝突後の液滴では衝突角度が影響する異なる合体分裂現象が生ずることが分かった．

本実験は微小液滴の衝突について明確な説明が出来るほどまだ十分な量のデータを得ていないが今後それらについて考慮した実験を進めるする上で参考になる結果や現象が観察されたと思っている．もっと小さい数十マイクロオーダーの液滴についての

衝突実験を考えていると同時に燃料噴霧としての、炭化水素系液体の基礎的な微粒化特性解明に役立つ方向を向いて探究したいと考えている。

終に、本研究の実験に協力してくれた4年次生原田孝夫君に深く感謝します。

参考文献

- (1) 葉他：第1回微粒化シンポジウム講演論文集，1992-2，p.125.
- (2) 西尾他：JAERI-M7594，日本原子力研究所，1978-3，34.
- (3) 梅村：日本機械学会論文集，57巻，535号（1991-3），323.