

STUDY ON DISINTEGRATION OF THIN LIQUID SHEETS

(1st Report : Separation of causes of disintegration by contact needle method)

森 章夫, 桂川 直己, 徳岡 直静
 (Akio MORI) (Naoki KATSURAGAWA) (Naochika TOKUOKA)
 慶應義塾大学 日本ペイント(株) 慶應義塾大学
 (KEIO Univ.) (Nippon Paint Co., Ltd.) (KEIO Univ.)

The disintegration process of thin liquid sheets was investigated in this paper. We prepared six fan spray nozzles for making thin liquid sheets which thickness parameter was different and velocity was equal. To measure a condition of liquid sheet quantitatively, frequency and contact ratio were measured experimentally by contact needle method which acts as a make and break device in an fluctuating liquid sheet. Then, we separated these three causes of disintegration (: Possibility of perforations, Possibility of disintegration of liquid sheet, Frequency by fluctuation of waves) by changing measuring terminal. As a result, it was found that amplitude, frequency by disintegration of liquid sheet and possibility of perforations increased with thickness parameter when velocity of liquid sheets were constant. We showed an index which indicated that disintegrating pattern of liquid sheet was like that of wavy sheet or perforated sheet.

Key Words :Thin liquid sheet, Contact needle method, Disintegration, Frequency, Perforation

1. 緒 言

液膜の分裂に関する研究は、理論解析から実験的研究に至るまで数多く行われている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。静止大気中での液膜は、その分裂形態により、液膜上に発生した穴が広がることによる分裂が支配的なPerforated Sheet、液膜の波動による分裂が支配的なWavy Sheetの二つに大きく分けられる⁽³⁾。それぞれの分裂形態に関する理論的解析、分裂後の生成粒子特性への影響も研究されているが、実際の圧力噴射弁などから生成される薄い液膜の分裂においては、この二つの分裂が混在しているために、流動機構についての分析、説明が困難である。

本研究では、Fan spray nozzleにより生成される薄い液膜について、液膜の分裂機構の解明において非常に重要である波動特性や分裂点の空間的位置変動などの定量的測定のため、触針法により液膜の運動および分裂状態を測定した。その際、測定端子の形状や設定位置および設定方法を工夫することにより、液膜の波動周波数、液膜の分裂確率、液膜表面の穴の存在確率を分離して解析する方法を考案した。その測定法により、

原稿受付：1996年4月27日

液膜速度が一定の条件の下で、液膜厚さが分裂形態にどのように影響するかを調べ、前述の二つの分裂形態について、支配的な分裂形態を示す指標を提示した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置概略

本研究に使用した実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は試料供給系統、噴射台、測定系統から構成される。試料には水道水を用い、試料タンクより圧縮窒素により圧送した。噴射弁は、形成される液膜の特性が比較的良好に知られている上、薄い液膜を容易に得られることから市販のFan spray nozzleを用い、大気中に鉛直下向きに噴射した。噴射弁は噴霧角が同じで噴射量の異なる6種類を用意した。あらかじめ試料にトレーサを混入し、LDVにより液膜中心軸上の流速を測定し、一定値(12m/s)となるように圧力を設定した。したがって、速度は同じで厚さ分布の異なる液膜が得られる。Fan spray nozzleにより生成される液膜を測定した結果、液膜の中心軸(Z軸)に沿った液膜厚さ h は次式で表される。

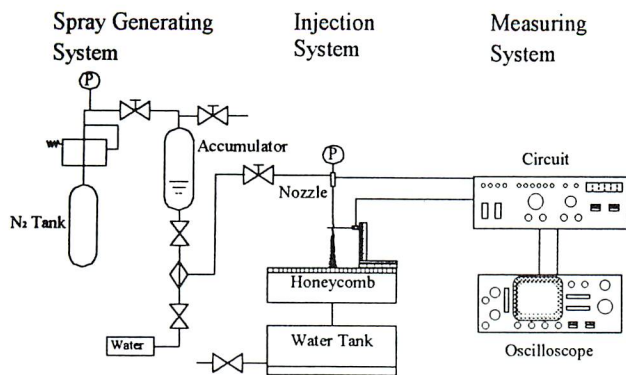


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Table.1 Thickness Parameters

Sheet No.	Thickness Parameter[m ²]	Velocity[m/s]
Sheet T175	1.75×10 ⁻⁷	12.0
Sheet T263	2.63×10 ⁻⁷	12.0
Sheet T428	4.28×10 ⁻⁷	12.0
Sheet T564	5.64×10 ⁻⁷	12.0
Sheet T979	9.79×10 ⁻⁷	12.0
Sheet T1396	1.40×10 ⁻⁶	12.0

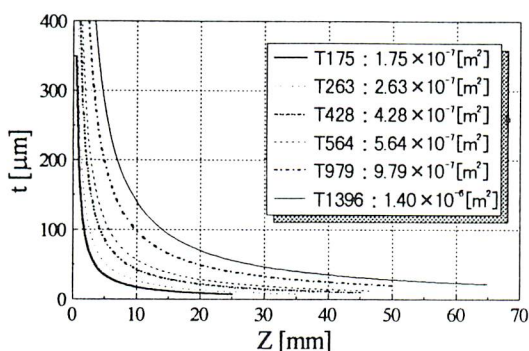


Fig.2 Distribution of sheet thickness

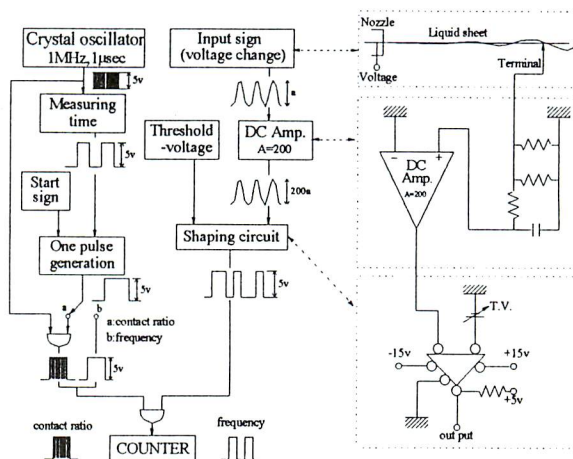


Fig.3 Schematic diagram of the contact needle method

$$t = \frac{K}{Z} \quad (1)$$

ここで、Kは膜厚係数と呼ばれ、噴射弁により決まる定数である。本研究で用いた各噴射弁の膜厚係数を表1に、噴射弁噴口からの距離と液膜厚さの関係を図2に示す。

一方、液膜状態の測定には、液膜の運動および分裂状態を定量的に測定できるように触針法を用いた⁽⁶⁾。触針法による測定の概略図を図3に示す。原理は試料の電気伝導性を利用したものであり、噴射弁と測定端子の間に電圧をかけ、測定端子が液膜に触れたときに起こる電圧上昇を検知するものである。検知される電気信号は非常に微小な電圧であるのでアンプにより増幅している。信号は立ち上がりおよび立ち下りに遅れ時間を持っているため、基準電圧(Threshold voltage)を設定して矩形波に変換する必要がある。本実験では、Threshold voltageの違いによる測定値への影響が最も小さくなるように、各測定点における平均最大電圧の1/2

をThreshold voltageに設定した。これにより、断続頻度 f (単位時間内の電圧上昇回数) および導通率 α (測定時間に対する通電時間の比) を求めることができる。また、各条件で測定時間の違いによる測定値のばらつきを検討した結果、測定時間を10秒以上取ればいずれの場合にも平均値が収束することを確認したため、測定時間は10秒とした。

また、本研究における座標軸は、噴射弁噴口を原点とし、液膜に沿った鉛直下向きをZ軸、液膜の法線方向をX軸、平行方向をY軸とした。

2.2 測定端子

触針法において測定端子が電圧信号を検知するのは、測定端子が液膜に触れていて、しかもそれより上流で液膜が切れることなく噴口から連続である場合のみである。本研究では測定点において得られる電圧信号のOn・Offを、上流における液膜の分裂による断続、波動による断続および液膜上に発生する穴による断続の3

つの原因による頻度に分離することを試みた。これらの3つの原因を分離するために、本研究では以下に示す3種類の測定端子を用いた。

(1)Terminal A

図4(a)に示すように、液膜の振幅より十分に長い細線の両端を固定した形のもので、細線が液膜の中心線を通り、かつ直角となるように十分に挿入された状態に設定し、噴射方向に移動させながら断続頻度 f_A と導通率 α_A を測定した。この場合、端子より上流で液膜が切れた場合および端子位置に穴が存在する場合には電圧信号が現れない。

(2)Terminal B

図4(b)に示すように、もっとも一般的に使われる触針で、細線を10mm程度突き出した形の端子であり、細線およびその延長線が液膜中心線に直行する状態を保ちながら、液膜の振幅方向(X方向)に端子を移動させ、断続頻度 f_B と導通率 α_B を測定した。この場合、端子より上流で液膜が切れた場合、端子位置に

穴が存在する場合および端子先端が液膜の位置より振幅方向に離れている場合には信号は得られない。

(3)Terminal C

図4(c)に示すように、噴射方向に10mm程度の長さを持った薄板の端子で、端子が液膜の中心線を含み、かつ直角になるように十分に挿入された状態で、測定端子を噴射方向に移動させながら断続頻度 f_C と導通率 α_C を測定した。この場合、他の端子と同様に上流で液膜が分裂した場合には電圧信号は得られないが、Terminal Aの場合と異なりその位置に薄板の幅以下の直径の穴であれば穴が存在しても電圧信号はある値となる。また、波動による信号は検知しない。

なお、Terminal A, Terminal Bは、細線の径により検知可能な穴の径が異なるため、得られる断続頻度と導通率の値も異なる。図5に、液膜T564における、異なる3種類の径の細線による測定結果をTerminal Cの測定結果とあわせて示す。細線の径が大きくなるほど測定可能な最小穴径が大きくなってしまいうため、断続頻

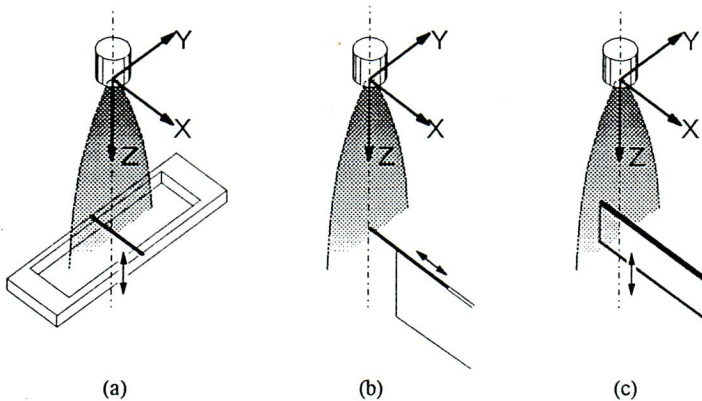


Fig.4 Schematic of measuring Terminals

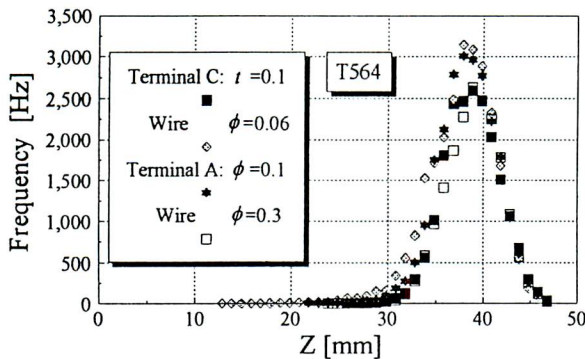


Fig.5 Effect of a diameter of wire on frequency

Table 2 Measuring terminal sizes

Terminal No.	Form	Size
Terminal A	Wire	ϕ 0.1
Terminal B	Needle	ϕ 0.1
Terminal C	Thin plate	t 0.1×10

度の値は小さくなっており、さらに $\phi \geq 0.3$ では測定端子上への水滴の付着が観察され、測定結果に影響していることがわかった。細線の径が小さいほど感度がよくなるため、測定には適すると思われるが、後に示す断続要因の分離式を適用するため、Terminal A, Terminal Bの径とTerminal Cの厚さが同じものを採用した。表2に測定端子の詳細を示す。

また、いずれの端子もX, Y, Z方向に任意に移動できるように3次元微動装置上に固定し、Terminal AとTerminal Cは、液膜の中心線に沿ってZ軸方向に1mm毎に、Terminal Bは、任意のZ軸の垂直断面でX軸方向に0.5mm毎に移動し、各点で断続頻度 f と導通率 α の測定をおこなった。

3. 断続要因の分離

液膜に対し、3種類の測定端子を挿入することにより得られる信号は、図6に示した断続要因と各測定端子の関係から以下のように整理される。

(1) 穴の存在による断続： f_p

図6(a)に示すように、液膜に生じる穴により、測定端子が液膜に触れなくなることによる断続であり、Terminal AとTerminal Bにより検出される。

(2) 波動による断続： f_w

図6(b)に示すように、液膜が波動運動により測定端子の先端から離れることによる断続であり、Terminal Bにより検出される。

(3) 液膜の分裂による断続： f_d

図6(c)に示すように、測定端子が噴射弁噴口から連続である液膜に触れている状態で、測定位置より上流で液膜が分裂することによりおこる断続であり、Terminal A, B, Cのすべての測定端子により検出される。

いずれの断続要因も、単独の測定端子では測定することができないため、三つの測定端子による出力結果より、以下の方法により断続要因を分離した。

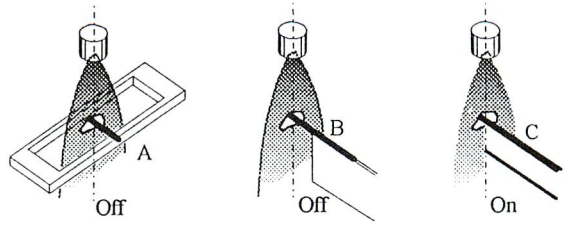
Terminal Cは鉛直方向に十分な長さを持った板状端子であり、液膜に完全に挿入することにより穴の存在による断続とX方向の波動による断続は検知しない。したがって、

$$f_{pc} = 0, f_{wc} = 0$$

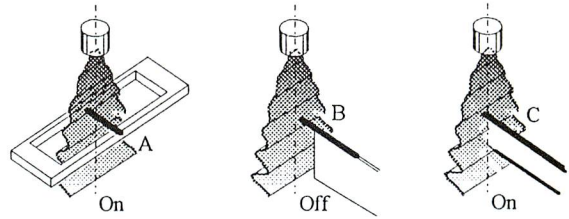
となる。また、Terminal Aの場合には細線が液膜に完全に挿入されており、穴の存在による断続は検知するが、X方向の波の変動による断続は検知しないため、

$$f_{fa} = 0$$

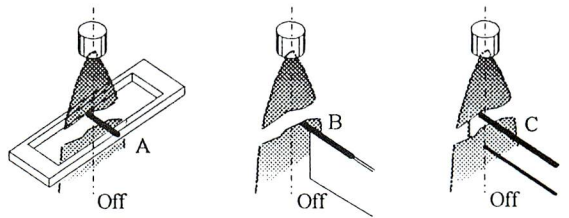
となる。



(a) Frequency by perforation



(b) Frequency by fluctuation of waves



(c) Frequency by disintegration of liquid sheet

Fig.6 Schematic of relation between three components of frequency and measuring terminals

Terminal Aで断続頻度を計測する際に、測定点より上流における液膜の分裂と測定点に穴が存在する現象が同時に生じた場合、断続は1回と数えられ、穴の存在あるいは上流での液膜の分裂を見落とすことになる。二つの現象が同時に発生する可能性は低い、Terminal AとTerminal Cにより求めた導通率の比を用いて補正が可能である。これは、断続頻度(測定時間内の電圧信号の断続回数)を導通率(測定時間内における電圧信号の上昇している時間の和)で除することにより、各測定位置において1秒間の連続時間を考えたとき、それぞれ何回分の連続状態の和になっているかを求めることにより断続確率を算出するものである。

また、Terminal Bは細線を液膜に垂直方向から徐々に挿入することにより、穴による断続および液膜の分裂による断続に加えて、X方向の波動による断続を検知する。Terminal Bの先端が液膜の中心を越えて十分な距離だけ挿入した状態では、Terminal BはTerminal Aと位置、形状において全く同じ意味合いを持つため、 f_b は f_a に、 α_b は α_a に、それぞれ一致する。したがって、任意のX

地点における測定値は、Terminal Aにより求めた導通率を用いて補正することにより、波動周波数のみを分離することが可能となる。

すなわち、液膜上に発生する穴の存在確率 P_p 、液膜の分裂確率 P_d 、波動周波数 f_w は、式(2)~(4)より求めることができる。

$$P_p = \left(\frac{\alpha_c}{\alpha_A} f_A - f_c \right) \times \frac{100}{\alpha_c} \quad (2)$$

$$P_d = f_c \times \frac{100}{\alpha_c} \quad (3)$$

$$f_w = \left(f_B - \frac{\alpha_B}{\alpha_A} f_A \right) \times \frac{100}{\alpha_c} \quad (4)$$

また、分裂形態の違いを表す指標として、液膜の分裂確率 P_d が穴の存在確率 P_p で割った I_d を用いる。すなわち、

$$I_d = \frac{P_d}{P_p} \quad (5)$$

と定義する。 $I_d < 1$ の場合、液膜上に穴が存在している確率が液膜の分裂確率よりも高い状態を示しており、この範囲が広いほど液膜上の穴が広がることによる分裂形態に近いことが推測できる。

4. 結果および考察

4.1 液膜の分裂による断続頻度と連続長さ

Terminal Cにより測定した断続頻度 f_c および導通率 α_c のZ軸方向の変化を図7に示す。Terminal Cにより求められる測定値には、穴の存在および波動による断続の影響は含まれず、液膜の分裂による断続の影響のみを示すことになる。

断続頻度はいずれの液膜においても下流に向かうに

したがい次第に増加し最大値を示した後、再び減少する。この分布の形は、最大値を中心にほぼ対称となっており、液膜速度が同じ状態では膜厚係数が大きいほど断続頻度の最大値は大きく、分布の広がりも狭くなる。また、どの液膜においても断続頻度の最大値と導通率が50%を示すZ値はほぼ一致している。この点は、液膜の分裂が起きる確率が最も高いことを示しており、液膜の平均分裂点といえる。このZ値を液膜平均連続長さ l と定義する。この液膜平均連続長さは、膜厚係数が大きいほど長くなっているが、液膜速度は一定であるので、膜厚係数の大きい液膜ほど長い時間安定して存在していることになる。液膜と周囲空気との相対速度は一定であると考えられるため、液膜を崩壊させようとする空気力学的力は一定であると考えられるが、それに関わらずこのような傾向が見られる理由としては、厚い液膜においては乱れの成長度が小さいことや、穴の生成が起りにくいなどが挙げられる。

Terminal Cによる測定値において、Z値を液膜平均連続長さ l により無次元化した無次元液膜の噴射方向距離 $Z^* (=Z/l)$ と断続頻度の関係を図8に示す。膜厚係数の増加にしたがい、断続頻度の最大値が減少すると同時に、断続頻度の分布の広がりも液膜の平均分裂点を中心として大きくなっており、分裂の起こる可能性のある範囲が広がっていることを示している。これは、液膜の薄い部分ではわずかな乱れが液膜の分裂を誘発する一方、液膜が相対的に厚くなると、穴の生成や波動などの液膜の分裂要因のばらつきが、分裂が起こる点のばらつきに反映されやすいためと考えられる。

また、液膜平均連続長さ l と平均分裂点における液膜厚さ h の関係を図9に示す。液膜速度が同じ状態では、膜厚係数の増加にともない、液膜の分裂が起こりやすい点における液膜の厚さは液膜平均連続長さ l に比例し

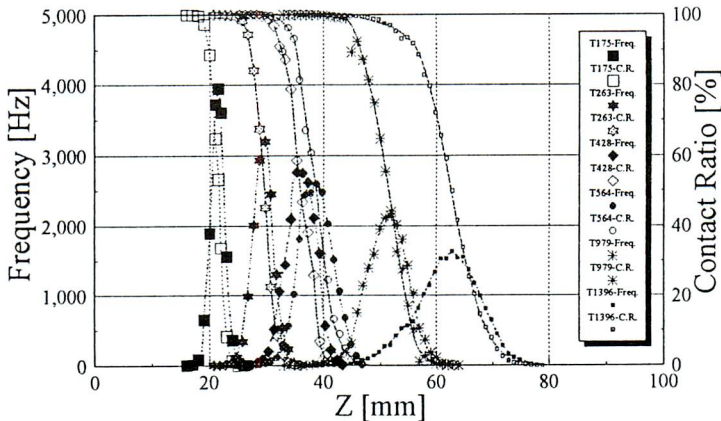


Fig.7 Distribution of Frequency and contact ratio measured by Terminal C

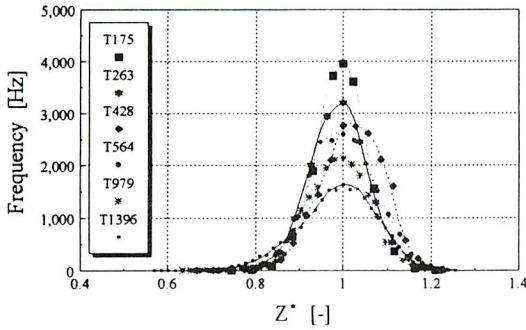


Fig.8 Relation between Z^* and frequency

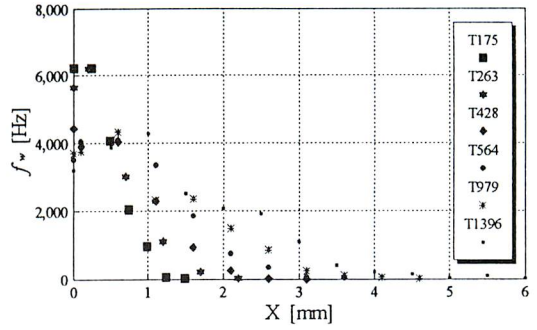


Fig.10 Distribution of frequency by fluctuation of waves

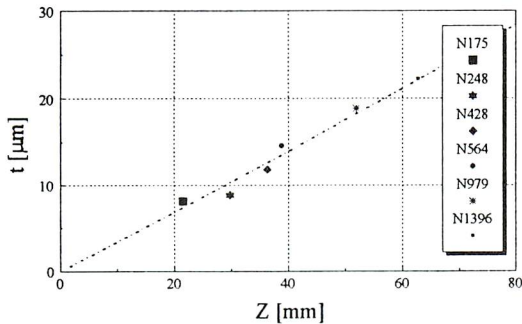


Fig.9 Relation between mean sheet length and sheet thickness at disintegration point

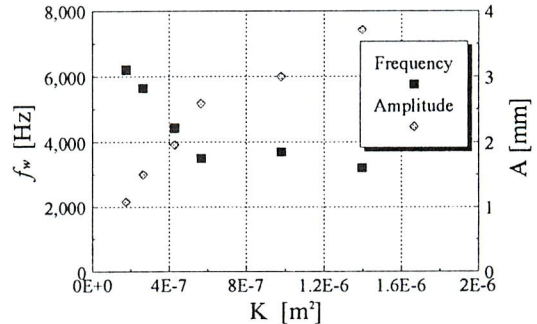


Fig.11 Relation between frequency and amplitude by fluctuation of waves and thickness parameter

て増加している。膜厚係数の大きな液膜では、後に示す波動の成長などにより下流に向かうにしたがって局部的に液膜が薄くなる部分が現れ、その部分を起点として液膜が分裂するため、平均分裂点の液膜厚さは増加しているものと考えられる。

4. 2 液膜の波動特性

3種類の測定端子による測定値をもとに式(4)により求めた平均分裂点を含む断面における液膜の波動周波数のX軸方向分布を図10に、平均分裂点の振動中心部における波動周波数および波動振幅と膜厚係数との関係を図11に示す。X軸の原点は、振幅の中心である。分布は中心軸上で最大値をとり、X方向に進むにつれて周波数は0に収束する。流速が同じ液膜では、膜厚係数の小さい液膜の方が平均分裂点での波動周波数が高く、振幅が小さいことがわかる。これは、液膜が薄い方が周囲空気から受ける力により変動しやすいとともに、微小な変動が分裂を誘発するため、振幅の大きな波が存在しにくいことによる。よって、膜厚係数が大きいほど、振幅の増加率は低くなるが、液膜連続長さが長くなるため、分裂点における振幅は大きくなると考えられる。

4. 3 穴の存在確率

Terminal AとTerminal Cによる測定値をもとに式(2)より求めた液膜上の穴の存在確率 P_p のZ軸方向の変化を図12に示す。液膜速度が同じ状態では、膜厚係数の小さな液膜ほど穴の存在確率 P_p の立ち上がり早く、急激な上昇をすることがわかる。すなわち、膜厚係数の小さな液膜ほど噴射口に近い位置で穴が発生しはじめ、急激に増加するのに対し、膜厚係数の大きな液膜では穴の発生は下流であり、その増加傾向も相対的に緩やかである。液膜に穴があく原因は、周囲空気との相互作用による乱れや液膜表面に粒子が直接衝突することなどが指摘されている⁽³⁾。したがって、液膜が薄いほど周囲空気の乱れなどの穴の生成要因による穴の生成が容易に起こる一方、相対的に厚い液膜では乱れが小さいことにより液膜連続長さが長くなり、下流に行くにしたがって液膜厚さが薄くなることにより、穴があく頻度が高くなるものと考えられる。

また、穴の存在確率 P_p の立ち上がる点から平均分裂点までの距離を液膜速度により除することにより求めた液膜上に穴が存在する時間と膜厚係数の関係を図13に示す。膜厚係数の大きい液膜では液膜平均連続長さが長いために、生成した穴が分裂点に至るまでに相対的に長い時間液膜上に存在し、その時間だけ穴が成長

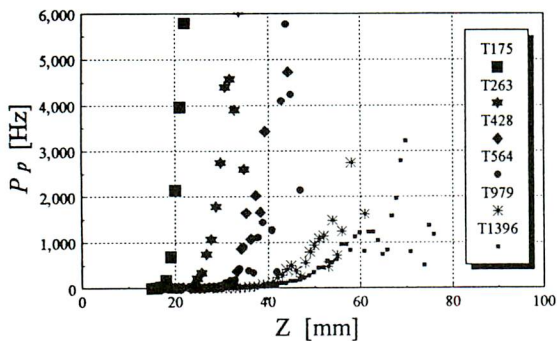


Fig.12 Distribution of P_p

すると考えられるので、厚い液膜の分裂点付近では相対的に大きな穴が存在するものと推測できる。一方、膜厚係数の小さい液膜では穴の存在する時間が短く、穴が成長する間もなく分裂に至ることになるが、これは周囲空気の流れなどに直接起因する穴というよりはむしろ、波動による分裂過程において液膜が崩壊しはじめる瞬間において、液膜の局所的に薄い部分に発生する亀裂を穴として検知しているものと推測できる。

4. 4 分裂形態を示す指標

Terminal AとTerminal Cによる測定値をもとに式(5)により求めた分裂形態を示す指標 I_d のZ軸方向分布を図14に示す。分布は噴射口近くでは0を示し、下流に向かっていしたがいで次第に上昇し、平均分裂点付近では急激に上昇している。これは、いずれの液膜でも初期は穴の存在による断続が生じるが、分裂点に近づくとしたがって液膜の分裂による断続が増加し穴の存在による断続よりも支配的になることを示している。膜厚係数が大きい液膜ほど I_d が1より小さい領域が広く、液膜連続長さが長いことにより、穴による断続が支配的である領域が広いことが分かる。これは、相対的に乱れが小さいために、穴が存在しても分裂には至っていない状態を示しており、空気との相対速度の違いにより引きちぎられるWavy sheetの分裂形態よりも、穴が広がることにより分裂するPerforated sheetの分裂形態に近いと推測できる。

5. 結 言

本研究では、Fan spray nozzleにより生成される薄い液膜の運動および分裂状態を定量的に測定するために、触針法を応用した測定装置を用いて実験、解析をおこない、その可能性を検討した。さらに、試料に水道水を用いた場合、本研究の実験範囲において以下の知見を得た。

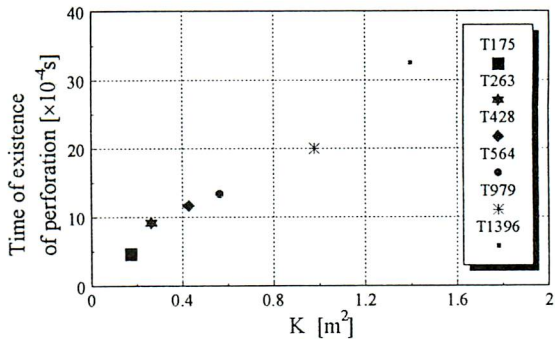


Fig.13 Relation between K and time of existence of perforation

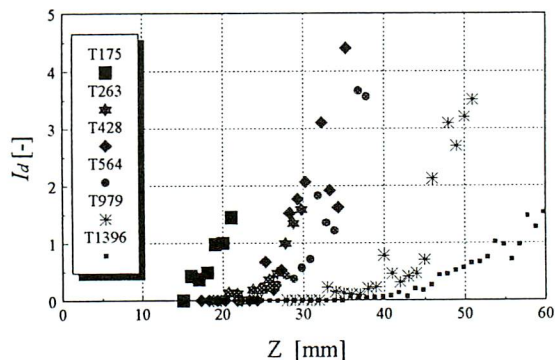


Fig.14 Distribution of I_d

- (1)触針法に用いる測定端子の形状を変えることにより、液膜の波動周波数、液膜の分裂確率および液膜表面に形成される穴の存在確率を分離して求め得る可能性を見いだした。
- (2)液膜の分裂頻度の最大値を示す点(平均分裂点)と導通率が50%を示す点は一致する。また、液膜速度が同じ場合には、膜厚係数が大きい液膜ほど分裂頻度の最大値は低くなる。
- (3)液膜速度が同じ場合、膜厚係数が大きい液膜ほど液膜平均連続長さは長くなり、分裂が起こりうる領域も広くなる。
- (4)液膜速度が同じ場合、膜厚係数の大きい液膜ほど平均分裂点における波動周波数は低く、振幅は大きくなる。
- (5)液膜速度が同じ場合、膜厚係数が大きい液膜ほど液膜上の穴の存在確率の増加率が低くなり、穴が生成してから分裂にいたるまでの時間が長くなる。
- (6)液膜の分裂形態を表す指標を提示した。液膜速度が同じ場合、膜厚係数が大きい液膜ほど液膜上に発生した穴が成長することによる分裂形態の度合いが相対的に増加する。

今後は種々のパラメータを変化させた実験結果により、一般的な液膜の分裂機構全般を網羅する必要があると考えられる。

参考文献

- (1) Squire, H. B., *Brit. J. Appl. Phys.*, **4**, (1953) 167~169
- (2) Hagerty, W. W., and J. F. Shea, *J. Appl. Mech.*, **22**, (1955) 509~514
- (3) Fraser R. P., Eisenklam P., Dombrowski N., and Hasson D., *AIChE J.*, **8**, (1962) 672~680
- (4) Dombrowski N. and Johns W. R., *Chem. Eng. Sci.*, **18**, (1963) 203~214
- (5) 新井隆景, 橋本弘之: 日本機械学会論文集, **51-470, B** (1985) 3336~3342
- (6) Tokuoka N., Nagaosa S., Hora S., and Sato G. T., *Atomization and Spray Technology*, **1-2**, (1985) 103~123



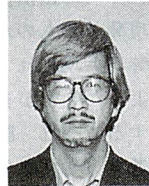
森 章夫
慶應義塾大学 大学院
理工学研究科 機械工学専攻
徳岡研究室
〒223 神奈川県横浜市港北区
日吉3-14-1
Tel. 045-563-1141 Ext. 3203
Fax. 045-563-5943

略歴：現在 慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程に在学。液膜の微粒化機構に関する研究に従事。



桂川 直己
日本ペイント(株)
自動車塗料事業部 第二開発部
(アルミED担当)
〒572 大阪府寝屋川市池田中
町19-17
Tel. 0720-39-9053
Fax. 0720-39-4560

略歴：1995年 慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業
同年 日本ペイント(株)に入社。
主にアルミニウム用艶消し電着塗料の開発研究に従事。



徳岡 直静
慶應義塾大学 理工学部
機械工学科 助教授
〒223 神奈川県横浜市港北区
日吉3-14-1
Tel. 045-563-1141 Ext. 3196
Fax. 045-563-5943

略歴：1971年 慶應義塾大学大学院工学研究科後期博士課程修了
主に燃料供給系や微粒子の挙動並びに設計・製図の研究・教育に従事。