

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-268

2噴流衝突型噴射器の微粒化に及ぼす
周囲圧力の影響

八柳 信之

1974年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

2 噴流衝突型噴射器の微粒化に及ぼす 周囲圧力の影響*

八 柳 信 之**

The Effect of Environmental Pressure on Spray Formed by Two Impinging Jets

By Nobuyuki YATSUYANAGI

ABSTRACT

Cyclic or intermittent variations in the flow of atomized propellants in rocket combustion chamber are of interest because of their possible effects on the combustion instability. Atomization by impingement of two liquid jets is a widely used method, but this atomization has been demonstrated to be intermittent in nature. Marcus F. Heidmann investigated the effects of injection velocities, jet diameters, impingement angles, jet length and injectant properties on the spray formation frequency, and found that the frequency of spray formation was nearly directly proportional to the injection velocity.

However, environmental pressure also may affect the spray formation frequency. In this study, the effects of the environmental pressures and injection velocities on spray formation frequency were investigated by using high speed motion photography. It was found that the spray formation frequency might be correlated with the Weber number based on length of a stable liquid sheet formed by impinged jets and the stable length of the sheet was a function of the injection velocity.

1. まえがき

液体ロケットの振動燃焼の原因の可能性の一つとして考えられるものに、噴射器によるプロペラントの微粒化が周期性を有する場合が考えられる。液体噴流の衝突型噴射器は実用液体ロケットエンジンに用いられているが、この形式によるプロペラントの微粒化は不連続である事が知られており、M. F. Heidmann¹⁾²⁾ は2噴流衝突型噴射器による液体の微粒化の不連続性を調べ、これがほぼ周期性をもつ事を示した。Heidmannはこの周期性におよぼす液体の噴射速度、噴流の直径、衝突角度、衝突点までの距離および噴射流体の性質の影響を調べ、微粒化の単位時間当りの頻度（衝突によって形成される液膜分裂の単位時間当りの頻度）が液体の噴射速度の液膜上

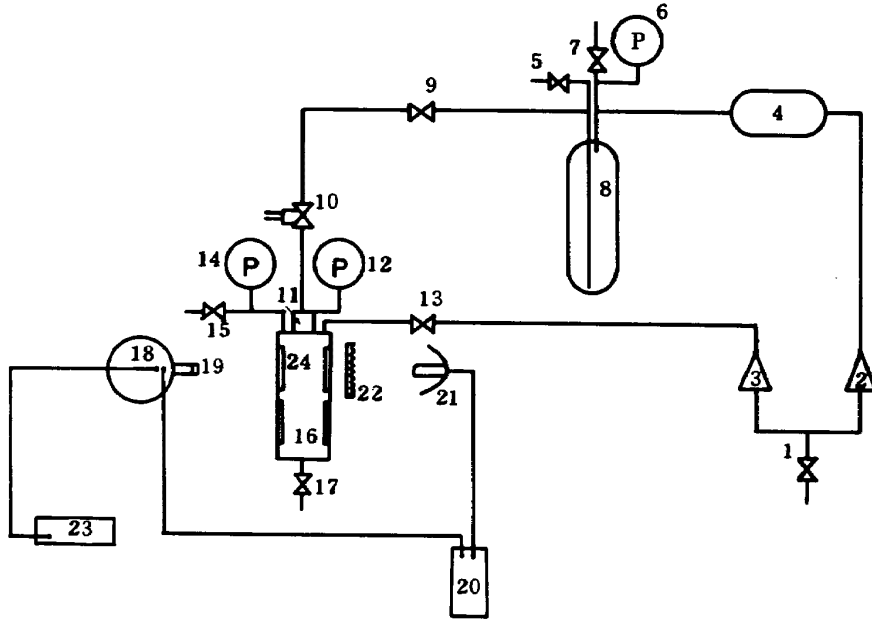
の速度成分にほぼ比例し、噴流の直径、衝突角度、衝突点までの距離は微粒化の頻度に本質的な影響を与えない事を明らかにした。しかしながら周囲雰囲気圧力、温度等も微粒化の頻度に影響を与える事が考えられる。本研究では周囲圧力および噴射速度の2噴流衝突型噴射器の微粒化の頻度におよぼす影響について調べ、微粒化（衝突によって形成される液膜の分裂）の単位時間当りの頻度が、衝突によって形成される液膜の安定長と、液体の噴射速度の液膜上の速度成分を基にするウェーバー数の約0.29乗に比例する事を明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の系統図を図1に示す。噴射流体には常温の水を使用した。加圧、圧送された水は流量調節弁を通り噴射器からテストチャンバーへ噴射される。テストチェ

*昭和49年10月29日受付

**角田支所



- | | | |
|------------|-------------|------------------|
| 1 止 弁 | 9 流量調節弁 | 17 ドレイン弁 |
| 2 調 圧 弁 | 10 電 磁 弁 | 18 高速度カメラ |
| 3 調 圧 弁 | 11 噴 射 器 | 19 焦点距離76.2mmレンズ |
| 4 アキュムレーター | 12 噴射圧力計 | 20 光 源 |
| 5 注 液 弁 | 13 止 弁 | 21 フラッシュランプ |
| 6 クンク圧力計 | 14 チェンバー圧力計 | 22 す り ガ ラ ス |
| 7 逃 気 弁 | 15 逃 気 弁 | 23 周波数カウンター |
| 8 水 タ ン ク | 16 チェンバー | 24 窓 ガ ラ ス |

図1 実験装置系統図

ンバーは調圧弁を通った空気により所定の圧力まで加圧されている。微粒化の様子は観察窓を通し高速度写真により観察した。本実験のパラメターの範囲は周囲圧力（テストチェンバー内圧力）が1気圧から1.5気圧，噴射速度は1.2.9 m/s から2.4.8 m/s である。実験に用いた噴射器の形状を図2に示す。噴口直径0.635 mm，衝突角度60度，衝突点までの距離4 mm であり，この噴射器の流量と噴射圧力の関係を図3に示す。テストチェンバーは内径50.8 mm 長さ430 mm の円筒であり，

14.3 mm × 95.4 mm の2個の観察窓を有する。用いた高速度カメラは Beckmann & Whitley 社のものであり 駒数は毎秒当り約8,500 から10,000 駒の範囲で使用した。駒数はカメラに内蔵されたマグネティックコイルからの電気信号を周波数カウンターにより測定することにより決めた。

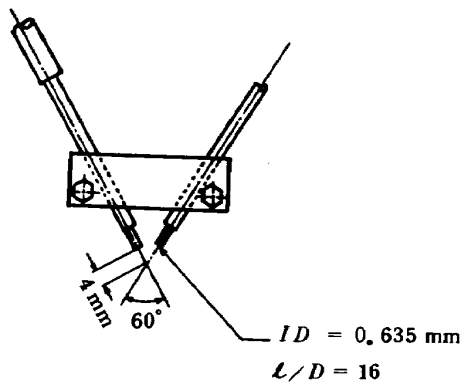


図2 噴射器形状

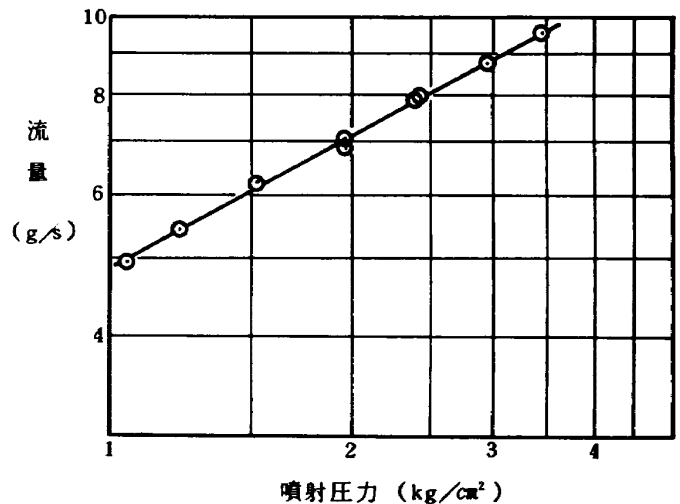
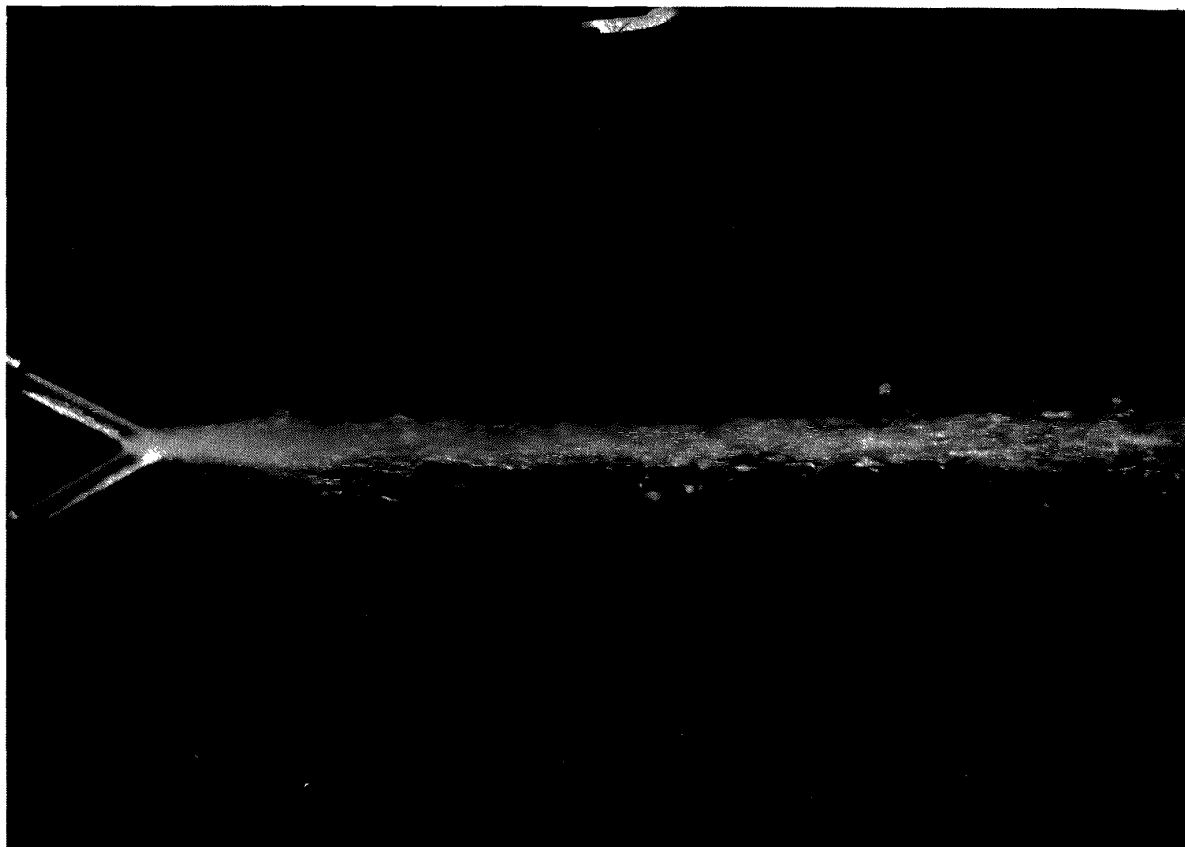


図3 噴射器流量特性



(b) 側面



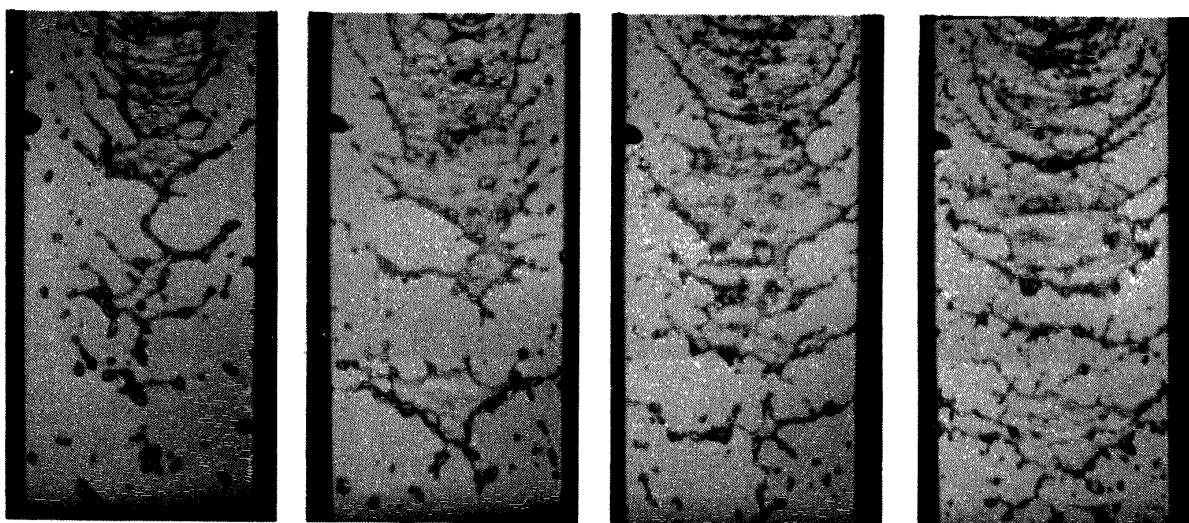
(a) 正面

図4 噴霧の直接写真

3. 実験結果

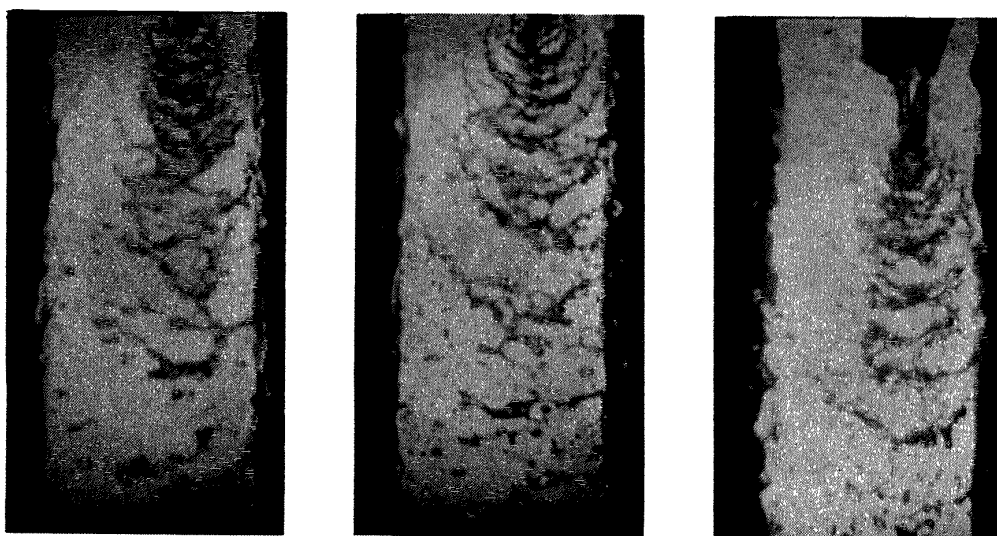
図4に代表的な噴霧の直接写真を示す。周囲圧力および噴射速度を変えた場合の代表的な液膜の分裂の様子を図5, 6, 7に示す。写真から明らかなように衝突によって形成された液膜は下流に行くに従い間欠的に分裂し、分裂した液膜は更に細かく分離し微粒化に至る。周囲圧力が低い場合には膜状のまま分裂するが、周囲圧力が増加するに従い紐状で分離される。衝突型噴射器の微粒化の不連続性はこれらより明らかである。図8は周囲圧

力が低く噴射速度が遅い場合の液膜分裂の過程を示した一連の写真である。写真から明らかな様に衝突によって形成された液膜は下流方向へ伸び、運動方向に直角な方向にくびれが生じ、このくびれは時間経過とともに大きくなりついには液膜の一部が分裂し、更にこれらから液滴が形成される。周囲圧力が高い場合の微粒化の過程を図9に示す。この場合は前述の如く分離された液膜は合体して紐状になり、更にこれらが下流に移動するにつれて分割され液滴を形成している様子が分る。一見ランダ



(a) $V_{inj} = 12.9 \text{ m/s}$ (b) $V_{inj} = 18.1 \text{ m/s}$ (c) $V_{inj} = 20.9 \text{ m/s}$ (d) $V_{inj} = 24.8 \text{ m/s}$

図5 周囲圧力が 1 atm の時の様子



(a) $V_{inj} = 13.3 \text{ m/s}$ (b) $V_{inj} = 19.6 \text{ m/s}$ (c) $V_{inj} = 22.8 \text{ m/s}$

図6 周囲圧力が 8 atm の時の様子

ムに見えるこれらの液膜の分裂および微粒化の不連続性を観察時間内にわたる時間平均的分裂の回数を基にする単位時間当りの頻度で整理すると、結果は表1および図10, 11に示す様になる。図10に Heidmann^{1), 2)}によって得られた大気圧下での実験結果も併示した。Heidmann によって用いられた噴射器は本実験と同一の形状のものであるが噴霧は自由空間内で作られている。Heidmann は液体微粒化の頻度を光源とホットエレクト

リックセルからなる光学系を直角に通過する分離された液膜又は液滴集団によって生じるシグナルを基にして求めた。Heidmann の結果と本実験の大気圧下での結果を比較すると微粒化の頻度は約3倍異なるが、本実験での頻度は基本モードであり、Heidmann の場合は高次のモードも含まれているものと考えられる。噴射速度の増加とともに微粒化の頻度が増加する傾向は同じである。Heidmann は大気圧下では液膜の分裂、微粒化の頻度

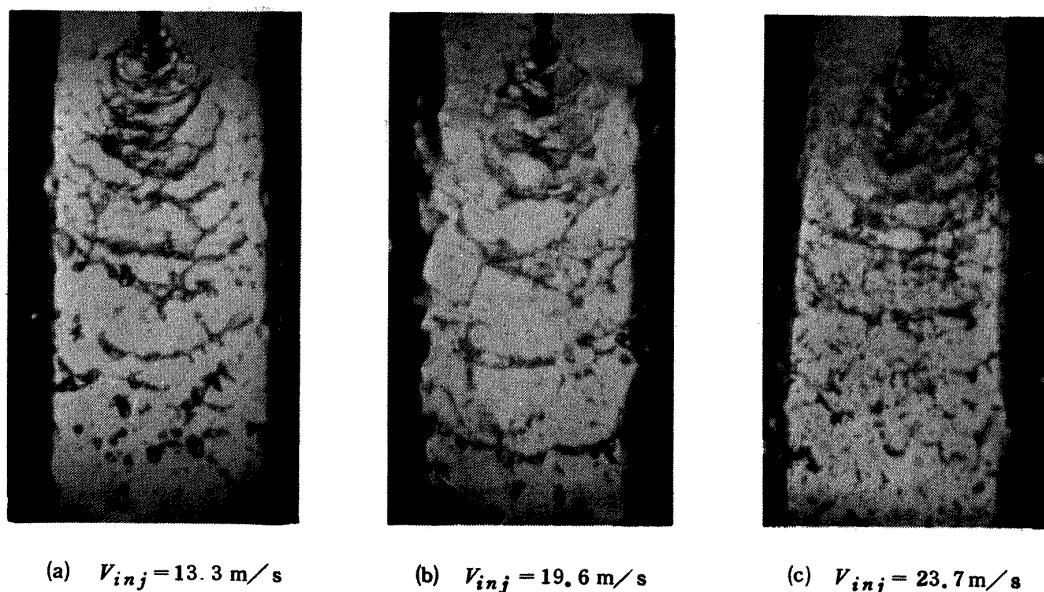


図7 周囲圧力が13.3 atm の時の様子

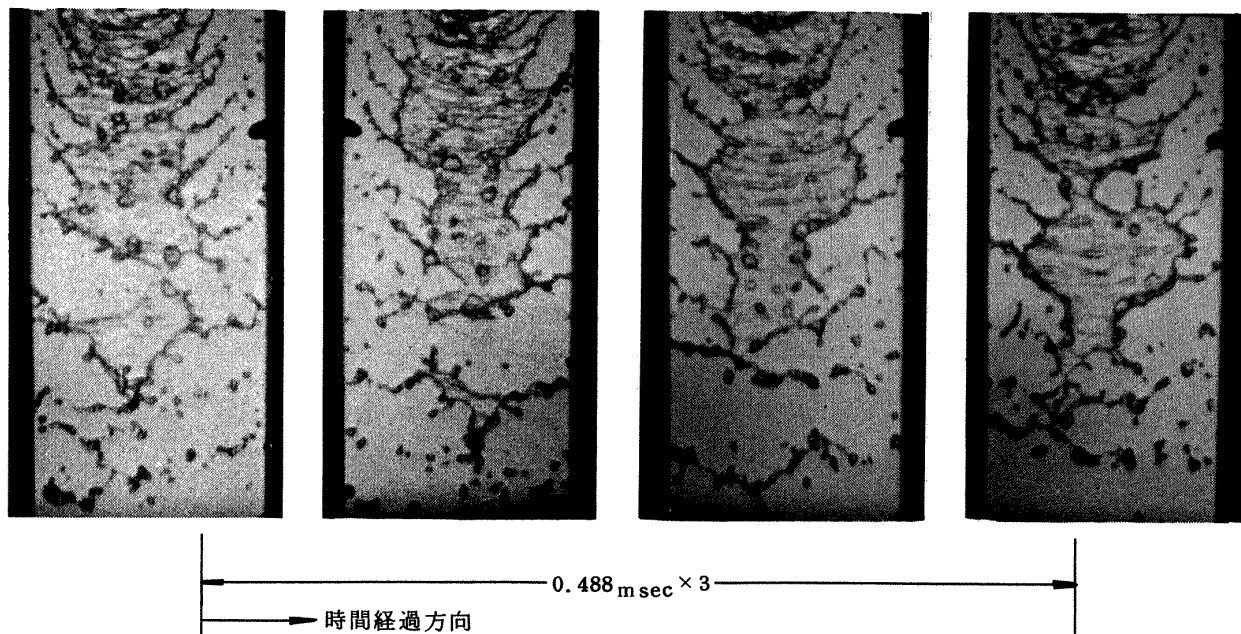


図8 液膜分裂の様子 $V_{inj} = 18.1 \text{ m/s}$, $P_e = 1 \text{ atm}$

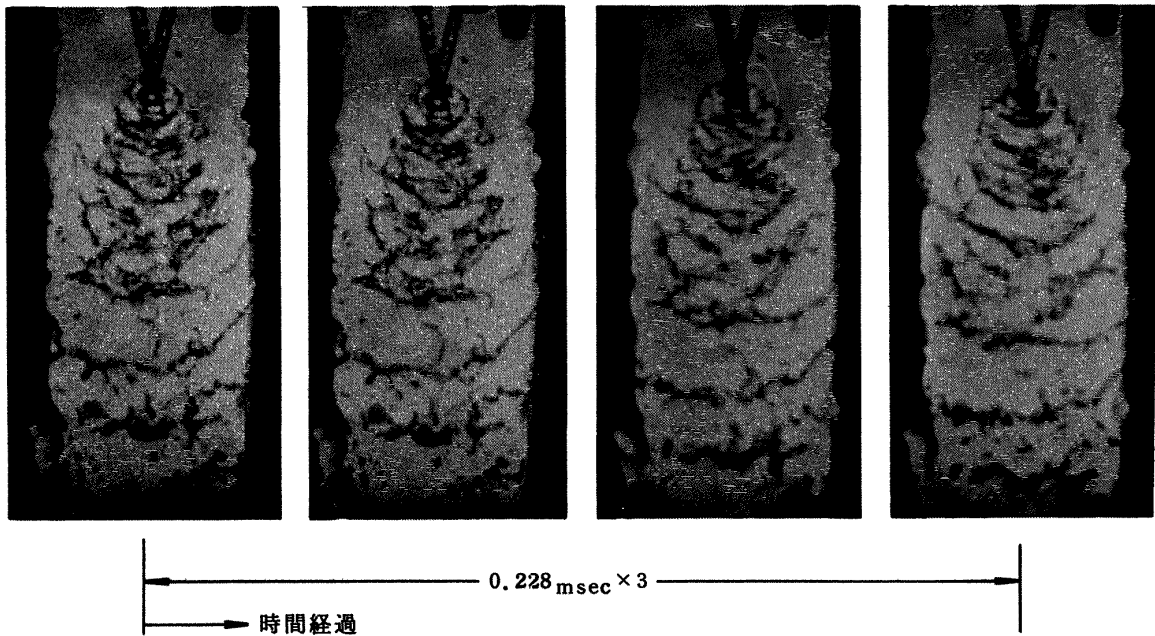


図9 液膜分裂の様子 $V_{inj} = 13.5 \text{ m/s}$, $P_e = 15 \text{ atm}$

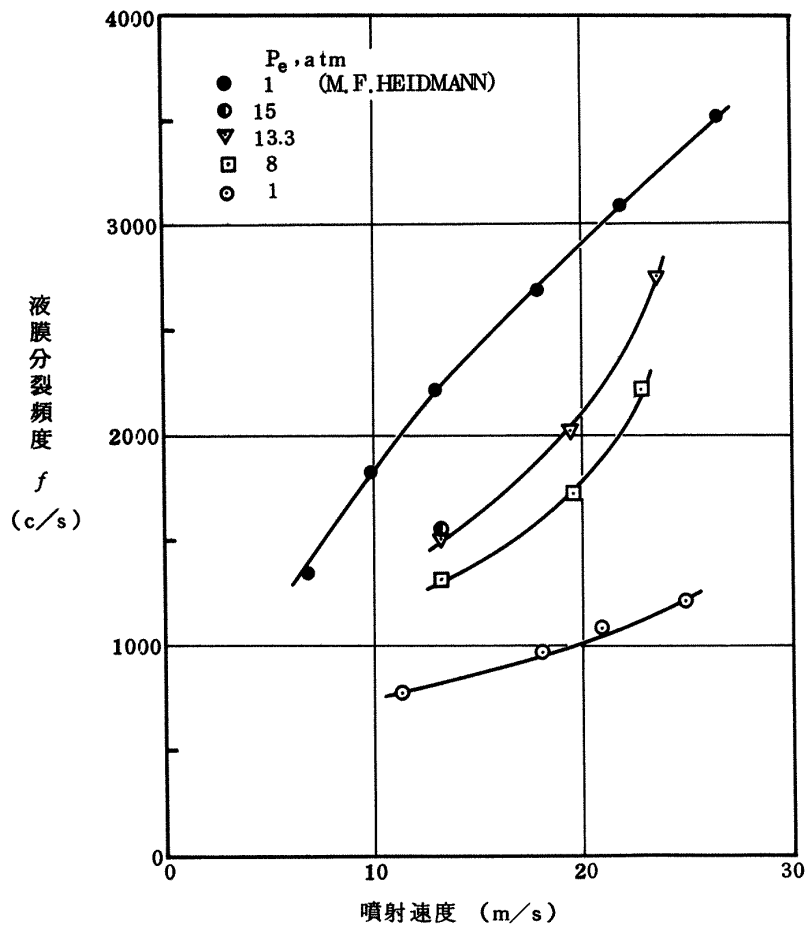


図10 液膜分裂頻度に及ぼす噴射速度の影響

表1 実験結果

P_e (atm)	V (m/s)	U (m/s)	L/D	We	FREQUENCY (c/s)
1	12.9	11.1	20.6	27	770
	18.1	15.7	26.9	70	950
	20.9	18.1	30.9	107	1070
	24.8	21.5	28.9	142	1200
8	13.3	11.5		231	1300
	19.6	17.0		660	1710
	22.8	19.8		1020	2200
13.3	13.5	11.5		390	1500
	19.6	17.0		1115	2000
	23.7	20.6		1870	2740
15	13.5	11.5		430	1520

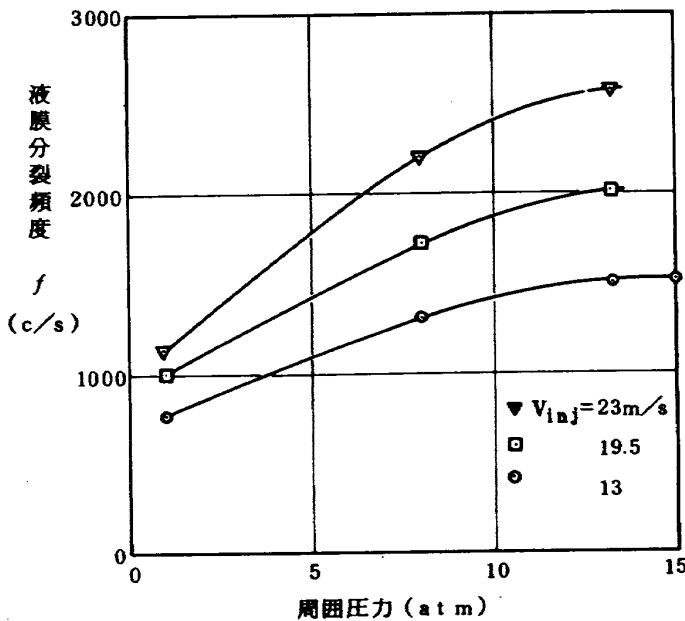


図11 液膜分裂頻度に及ぼす周囲気圧の影響

は噴射速度の液膜上での速度成分にほぼ正比例すると言っているが、周囲圧力の増加とともにこの正比例関係が成立しない事が図10から明らかである。なおHeidmannからの私信(1973年8月)によると観察された頻度の違いは実験条件によるものと思われると言っている。すなわち「私の実験においては噴霧の上流及び下流数フィートにわたりなんら障害物のない場で行った。これは噴霧のまわりにある種の空気の流を生じさせ、これらの流は予測しがたい影響を与えるものである」と言っている。

4. 考察

A. Haenlein³⁾ は単孔円筒ノズルからの液体噴流の観

察を行い、噴流と周囲気体の相対速度が4.7 m/sを越えるとき、液体の微粒化に対して空気力学的力が支配的となり、表面張力がこれをおさえる効果があると述べている。この事はウエバー数が噴流の微粒化を支配するパラメーターである事を示している。この考を2噴流衝突によって形成される液膜の分裂、微粒化に拡張して見る。図8を基に図12に示すような衝突によって形成される液膜のモデルを考える。ここにLは安定な液膜長であり、bは液膜の代表巾(最大巾)である。空気力学的な力が $bL\rho_a U^2$ に比例し、表面張力による力が $b\sigma$ に比例するものとすれば、ウエバー数は次のように表わされる。

$$We = bL\rho_a U^2 / (b\sigma)$$

従って液膜分裂、微粒化の頻度は安定な液膜長と液体の噴射速度の液膜上の速度成分を基にするウエバー数により整理される事が考えられる。ここで大気圧下での時間平均的な安定液膜長と噴射速度との関係を図13に示す。曲線下の領域においては液膜は安定であり、すなわち液膜はいまだ分裂せず、上の領域においてはなんらかの分裂が始まるか、あるいは微粒化が行われる。この安定膜長は噴射速度とともに増加しある最大長を有する事が分る。これらの安定膜長を基にしたウエバー数を用いて整理した結果を図14に示す。実験の範囲内では衝突によって形成される液膜分裂の頻度がウエバー数の0.29乗に比例する事が示される。Heidmannの大気圧下でのデータを図13の安定膜長Lを用いて再整理した結果も併示した。頻度の絶対値は約3倍異なるがウエバー数による頻度の増加の傾向は同一である。実験式は次のように表わされる。

$$f = 274 We^{0.29} \quad 30 \leq We \leq 2000$$

Heidmannの実験値に対しては

$$f = 803 We^{0.29} \quad 15 \leq We \leq 200$$

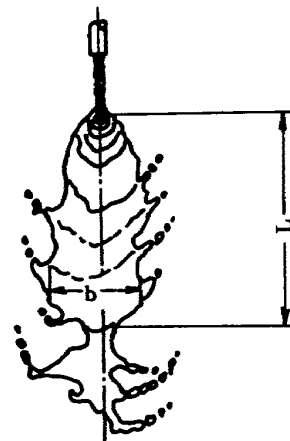


図12 液膜分裂時のモデル

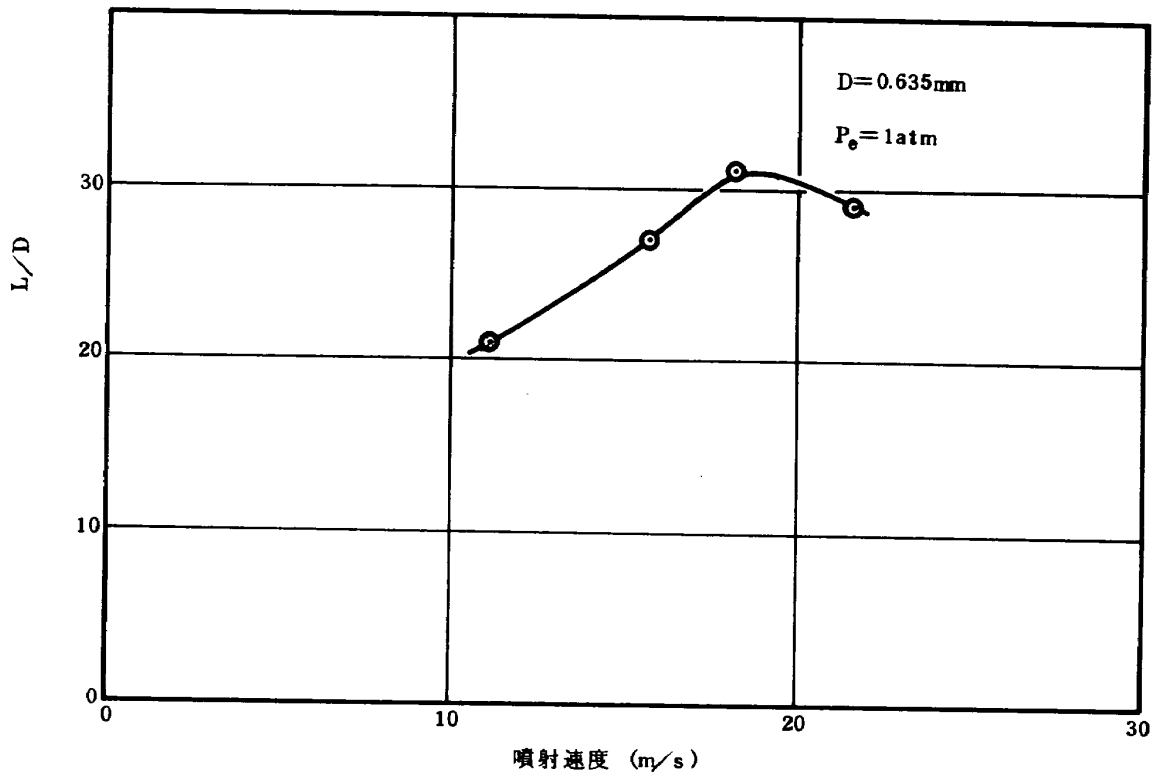


図13 安定液膜長に対する噴射速度の影響

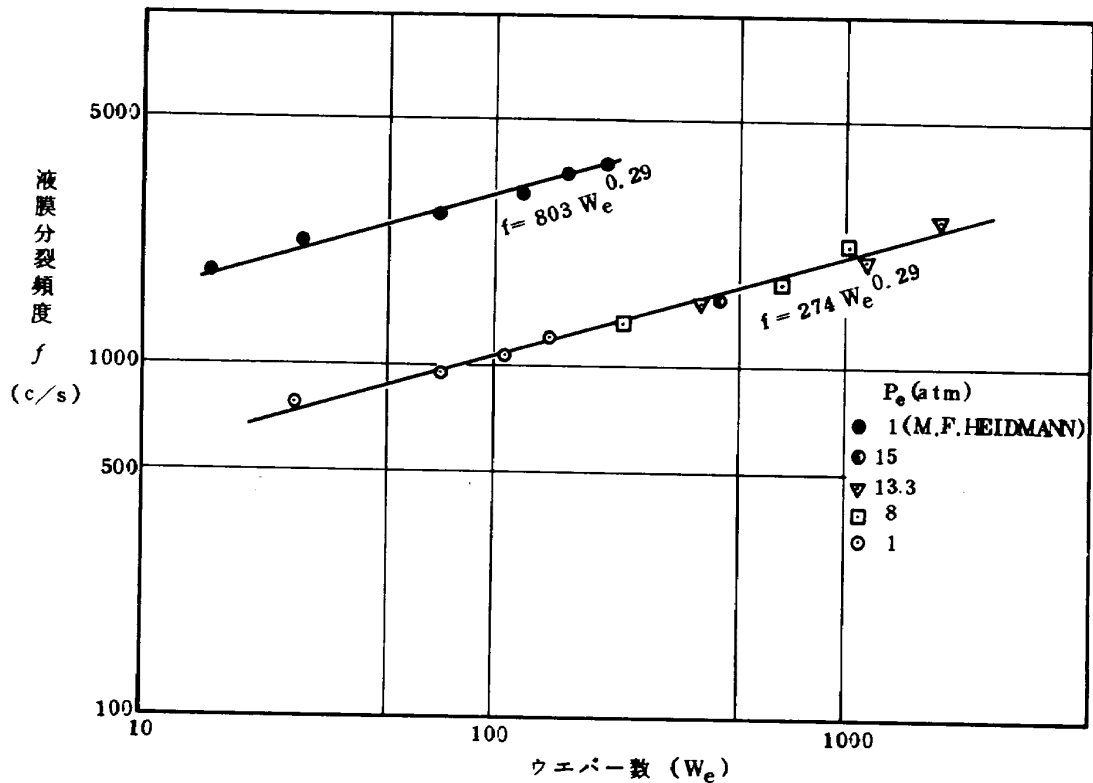


図14 ウェーバー数による液膜分裂頻度の表示

5. まとめ, あとがき

2 噴流衝突型噴射器によって形成される液膜の分裂, 微粒化の実験により次の結果が得られた。

- 1) 2 噴流衝突によって形成される液膜分裂, 微粒化の機構に対して A. Haenlein の考を拡張出来るものと思われる。
- 2) 2 噴流衝突によって形成される液膜分裂, 微粒化の単位時間当りの頻度はウエバー数の 0.29 乗に比例する。実験式は次のように表わされる。

$$f = 274 W_e^{0.29} \quad 30 \leq W_e \leq 2000$$

Heidmann の実験値に対しては

$$f = 803 W_e^{0.29} \quad 15 \leq W_e \leq 200$$

- 3) 大気圧下で衝突によって形成される液膜の時間平均的安定長は, 噴射速度とともに増加し, ある最大長を有する。

本実験においては周囲圧力及び噴射速度の影響を調べたが, 噴射流体の物性, 周囲温度, 周囲気体の流などの影響も調べる必要がある。終りに本研究を行うにあたってイリノイ工科大学の T. Paul. Torda 教授の御指導をいただいたことに感謝する。

記号

- b: 液膜最大巾
 f: 液膜分離, 微粒化の単位時間当り頻度
 D: 噴口径
 L: 時間平均安定膜長
 P_e : 周囲圧力
 U: 液膜上の噴射速度成分
 V: 噴射速度
 W_e : ウエバー数
 σ : 表面張力
 ρ_e : 周囲空気密度

文献

- 1) M.F. Heidmann; Fluctuations in a Spray Formed by Two Impinging Jets, Jour. Am. Rocket Soc. Vol. 22 (1952).
- 2) M.F. Heidmann., R.J. Priem., J.C. Humphrey; A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets, NACA TN 3835. March. (1957).
- 3) A. Haenlein; Disintegration of Liquid Jet, NACA TN 659. February (1932).

航空宇宙技術研究所資料268号

昭和49年12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)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
