

## 液体噴流分裂現象の周波数解析

(第4報, 位相スペクトルによる表面波の軸対称性解析)

Frequency Analysis for Disintegration Phenomena of Liquid Jet  
(4th Report: Phase Spectrum Analysis of Surface Wave Axisymmetry)天谷 賢児, 新井 雅隆  
(Kenji AMAGAI) (Masataka ARAI)  
群馬大  
(Gunma Univ.)

Axisymmetry of surface wave on liquid jets injected from a round nozzle into a quiescent air was measured by using the phase spectrum analysis. Two photo-sensor systems were used to obtain the amplitude of surface waves on a liquid jet. Each sensor system was consisted of a laser light sheet generator and a detector. Two laser sheets were set at parallel in one plane. The liquid column was flowed between two laser sheets with right angle to the plane. Phase spectrum between two signals of the photo-sensors was calculated by using a FFT analyzer. Non-axisymmetric structure of surface waves on the liquid column was discussed through the phase spectrum data. In the case of turbulent jet, the surface wave near the nozzle exit had a non-axisymmetric mode. Sinusoidal wavy modes were appeared in the low frequency region. This frequency region was lower than the main frequency of the surface wave.

**Keywords :** Liquid Jet, Disintegration, Instability, Frequency Analysis, Phase Spectrum, Wave Axisymmetry

## 1. 緒 言

円管ノズルから静止した気体中あるいは気流中に噴出する液体噴流の分裂現象に関しては、理論および実験の両面から多くの研究が行われてきた<sup>(1,2)</sup>。しかしながら、ノズル内の流れが乱流である乱流噴流の分裂現象に関しては十分な解析が行われていないのが現状である。特に、噴流内の乱れ成分が噴流表面波の構造に与える影響や、それと分裂現象との関連性については十分な解明が行われていない。著者らはこれまでに、不規則変動の解析に有効な周波数解析法を用いて噴流内部の乱れに起因する表面波と分裂現象を引き起こす波との関係を調べてきた<sup>(3-6)</sup>。また、分裂点を含めた噴流全体について表面波のスペクトル構造<sup>(7,8)</sup>を調べるとともに噴流表面波の異なる二点間の変動の相互相関解析を行うことで、表面波の空間構造<sup>(9,10)</sup>を明らかにした。本報では、これらの周波数解析の手法をさらにすすめ、位相スペクトルを用いて噴流表面波ならびに分裂過程の非対称性を解析した。

## 2. 実験および方法

実験装置の概略を図1に示す。装置の基本構成は既報<sup>(3-5)</sup>とほぼ同様である。噴流を形成するための円管ノズルには内径  $D$  が 2mm のものを用いた。ノズル出口において十分発達した流速分布が得られるように直管部長さは 100mm とし、管径の 50 倍とした。実験に使用した液体は水道水で、加圧タンクより供給した。噴出レイノルズ数は次式で定義した。

$$Re = \frac{4Q}{\pi v D} \quad (1)$$

ここで、 $Q$  は噴出流量、 $D$  はノズル内径、 $v$  は水の動粘性係数である。噴流の分裂の様子はストロボ光を用いた肉眼観察のほか、35mm スチルカメラによる写真観察によって調べた。

噴流液柱の表面変動の対称性を検出するためにレーザ光を用いた厚みセンサーを利用した<sup>(6)</sup>。これは、レーザシート光を発生する光源と受光部より構成されている。シート光厚さは 1.0mm、幅は約 10mm である。噴流の対称性を検出するために、シート光を図2に示すように平行に配置し、それらのシート光の間を噴流が通過するようにした。二つのシート光間の距離をできる

だけ小さくするために、図のようにミラーを配置した。このとき、光の進行方向は対向するようにした。これは、噴流によって曲げられた光が二つの受光部に同時に入射するのを避けるためである。

図3は二つのセンサーの特性を示したものである。直径4mmのガラス棒をシート光と直交するように挿入した。図は、シート光のスパン方向にこの棒の位置を変えた際に見られるセンサー信号の出力低下を示している。図の横軸は二つのシート光の間に中心 (x=0) を置き、シート光のスパン方向にx軸をとっている。センサー出力はともに台形型の曲線を示している。ガラス棒の一部がセンサー光を遮断しはじめるとセンサー出力が減少し、ガラス棒がシート光内に完全にいった状態で約1Vの電圧降下が生じた(台形の底面部分)。ガラス棒が二つのセンサーを跨ぐ場合にはそれぞれの出力レベルが入れ替わった。このように二つのセンサーの特性はほぼ同一で、噴流液柱がこれらのセンサーを横切る場合にその信号が検出できることが確認できた。

噴流表面波の非対称性を評価するために、二つのセンサーからの信号の位相スペクトルを求めた。位相スペクトル  $\theta(f)$  は次式によって計算できる<sup>(1)</sup>。

$$\theta(z, f) = \tan^{-1} \frac{Q_{12}(f)}{K_{12}(f)} \quad (2)$$

ここで、 $Q_{12}(f)$ はクオドラチャスペクトル、 $K_{12}(f)$ はコスペクトルで、二つのセンサーから得られる信号のクロススペクトルの実部と虚部である。

フーリエ変換によりセンサーの信号は様々な周波数の正弦波信号の重ね合わせで表現される。位相スペクトルはこれらの正弦波信号中の同一周波数を持った二つの信号間の位相差を求めたものである。実際にはFFTアナライザー(小野測器製, CF350)を用いて位相スペクトルを得た。

センサー信号の位相スペクトルで得られる位相情報と液柱の変動の関係を模式的に示したものを図4に示す。図に示すように基本的には四種類の変動が考えられ、実際の表面波は様々な波長成分からなるこれらの変動の重ね合わせになっている。今、図中のC-C'面に液柱の平均中心軸があるとし、その両側にレーザーシート光が通過するように設定する。液柱が軸対称波(Axisymmetric wave)である場合、両方のシート光の一部を遮光する液柱部分の変動が全く同期して起こるので、二つのセンサーの波形には位相差が現れない。したがってこの場合には位相  $\theta=0\text{deg}$  となる。同様に表面波がC-C'面に対して対称波(Symmetric wave)である場合にも、二つのセンサーで検出される信号間の位相

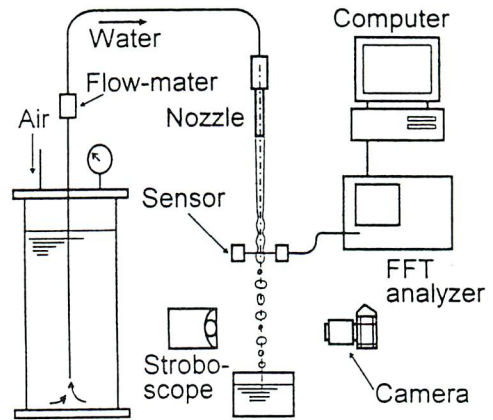


Fig.1 Experimental apparatus

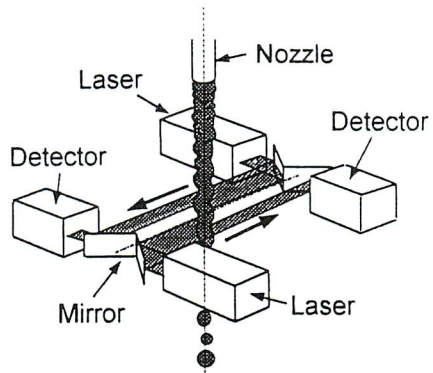


Fig.2 Photo-sensor system

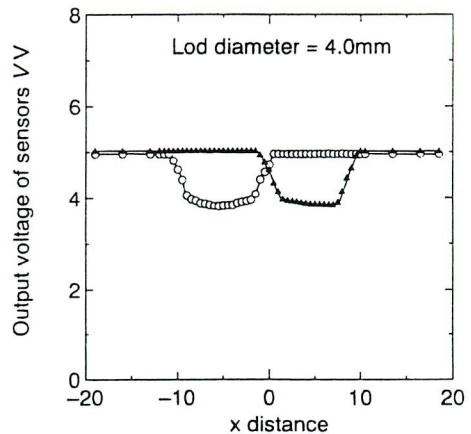


Fig.3 Basic characteristics of photo-sensor system



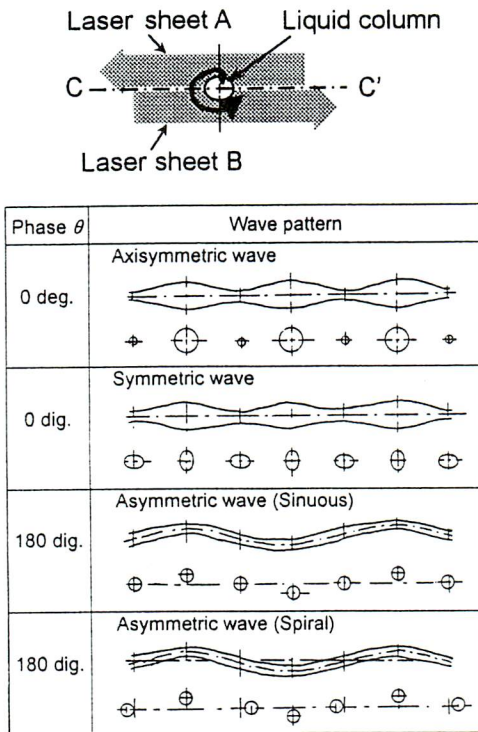


Fig.4 Relationship between wave patterns and phase

は 0deg.となる。したがって、このセンサーはこれらの変動を分離して測定することができない。このような軸対称と面対称の分離測定はシート光を直行するように配置した直行センサーを用いる必要がある<sup>(9)</sup>。

次に、液柱が C-C'面に直行する方向に蛇行している

波 (Sinuous wave) の場合、それぞれのシート光の部分的な遮光が交互に行われることになる。これは、液柱の平均的な中心軸の周りにらせん状の波動 (Spiral wave) が生じた場合も同様であり、これらの波動に関するセンサー信号間の位相は 180deg.ずれたものになる。したがって、ここで用いているセンサーでは二つの信号間の位相を測定することで対称波と非対称波の分離計測が可能になる。位相スペクトルではこのような表面波の対称性を周波数ごとに求めることが可能である。

### 3. 実験結果および考察

3.1 液柱表面波の写真観察 まず、噴流液柱の表面波の様子を写真像をもとに観察した。非対称波動が存在すると考えられる乱流噴流について、その液柱の各位置で表面波の様子を調べた。Re=16000 の場合の結果を図 5 に示す。この場合の分裂長さはほぼ 210mm であった。ノズル出口直下ではスケールが小さく、細かい不規則波が見られた。これらの波は写真の左右で対称的ではない。下流になるにしたがって、スケールが大きくなる様子が見られた。また、図中 A 部分のように明らかに左右にうねるような波動も観察された。分裂点では B の部分で見られるように、大きなくびれが生じ、この場合の波動は写真の左右でほぼ対称的な形状になった。また、それぞれから形成される液滴自身は比較的軸対称性が高い。ただし、それぞれの液滴の中心は噴流軸と必ずしも一致していない。

以上のように、乱流液柱の表面波には非対称成分が存在することが確認できるが、それらの成分が有する周波数特性や、対称成分の割合等は写真観察だけでは定量化できない。

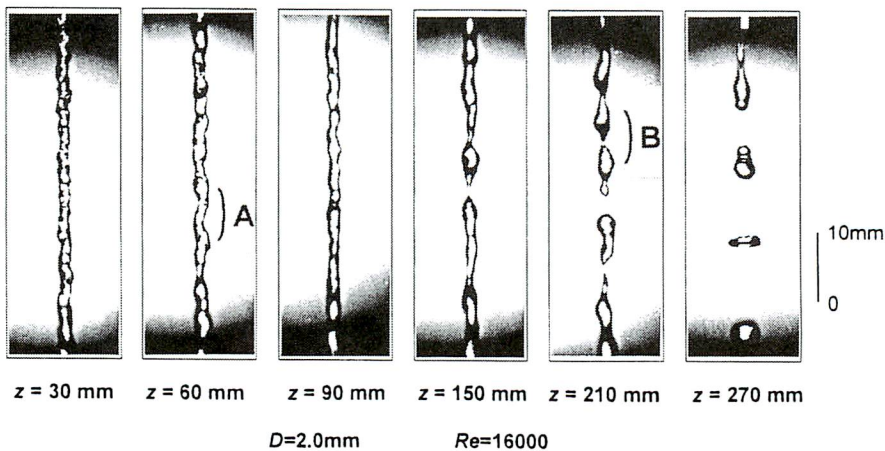


Fig.5 Photographs of surface wave on liquid column

3. 2 液柱表面波の位相スペクトル解析 最初に、軸対称性が高いと考えられる滴下現象の実験を行い、ここで開発したセンサーの基本特性を確認した。滴下現象の場合、液滴は周期的に形成される。図6はノズルから測定位置までの距離を変えて、液滴が通過する信号の周波数スペクトルを求めた結果である。液滴の通過周期に対応した鋭いピークが見られ、極めて周期性の高い分裂が生じていることが確認できた。同じ測定位置で位相スペクトルを求めた結果を図7に示す。いずれの位置でも0Hzの近傍で位相差が検出されたものの、ほかの周波数範囲では位相差はほとんど見られなかった。特に、液滴の通過周波数においても位相は0deg.であり、本センサーが対称性を正確に検出できることが確認できた。

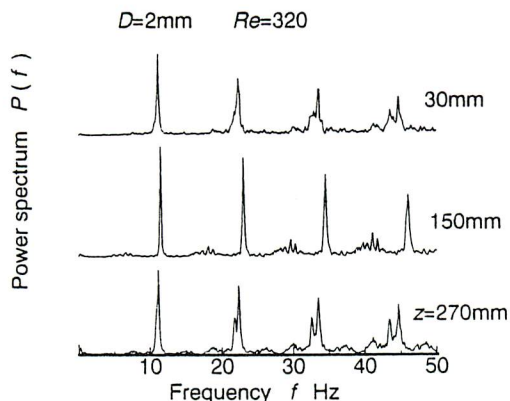


Fig.6 Frequency spectrum of dripping phenomena

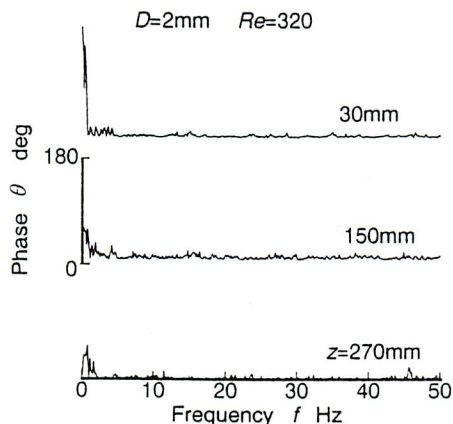


Fig.7 Phase spectrum of dripping phenomena

図8および9は層流噴流の周波数スペクトルと位相スペクトルを示している。測定はノズルからの距離を変えて行った。ただし、層流噴流の場合、ノズル近傍では表面波が発達しておらず、正常な位相スペクトルが検出できたのは  $z > 160\text{mm}$  の範囲であった。

図8の周波数スペクトルでは、主に500Hz以下に特徴的なピークが見られた。特定の周波数成分が見られる反面、連続スペクトル成分も含まれていた。これは、

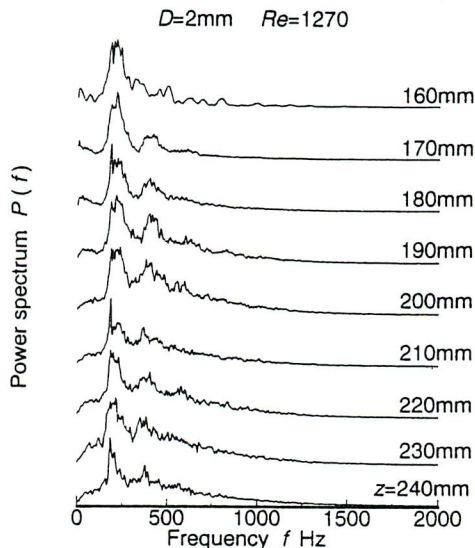


Fig.8 Frequency spectrum of laminar liquid jet

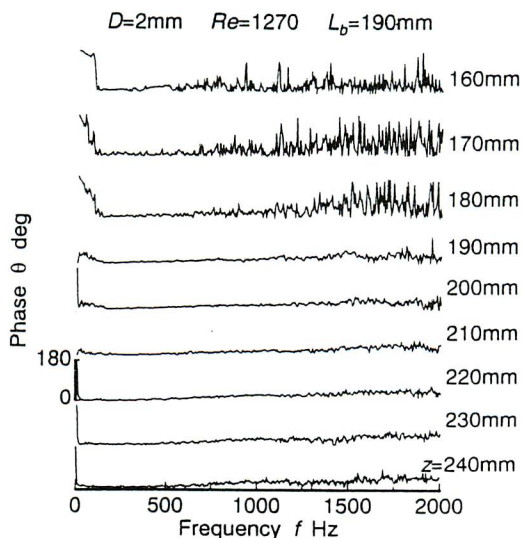


Fig.9 Phase spectrum of dripping phenomena



層流噴流でも表面波にはある程度の不規則成分が存在していることを示しており、既報で示した結果と一致している<sup>(5)</sup>。

位相スペクトルを見ると  $z=160\text{mm}$  付近で  $100\text{Hz}$  以下の領域に逆位相成分が見られたが、分裂点近くになると消失した。また、この  $100\text{Hz}$  以下の周波数領域では周波数スペクトル成分が少ないことから、逆位相成分を持つ波の絶対量は少ないものと考えられる。

$z=180\text{mm}$  までの領域では  $700\text{Hz}$  以上の領域に位相スペクトル成分が不規則に分布する領域が見られた。周波数スペクトルと比較すると、この周波数領域では波動成分が少なく、ノイズ等により位相成分が不規則に現れたものと考えられる。また、分裂点近傍と下流では高周波数域まで位相は小さくなった。これは分裂点近傍および下流になると、表面波の振幅が増え、信号強度が大きくなるためにノイズ成分が相対的に減少したためと考えられる。

乱流噴流の場合の周波数スペクトルと位相スペクトルを図 10 と 11 に示す。周波数スペクトルを見ると、ノズル出口近くでは表面波の最大周波数成分（以下基本周波数という）は  $500\text{Hz}$  付近であるが、下流になるのに従って低周波側へと移行した。これは、図 5 の写真からもわかるように、分裂点に近くなると比較的波長の長い波動成分が成長し分裂に至るため、この結果は既報とも一致している<sup>(5)</sup>。

位相スペクトルを見ると、ノズル出口近くでは低周波領域（ $500\text{Hz}$  以下）に逆位相成分が観察され、これはちょうど基本周波数よりも低周波側にあることがわかった。下流になるのに従って、基本周波数の低下と同時に、この逆位相成分も低周波側に移行した。また、高周波領域にはランダムな位相スペクトルが観察された。 $z=60\text{mm}$  より下流では同位相（ $0\text{deg}$ ）成分の領域が逆位相領域とランダムな位相の領域の間に現れ、それが下流になるほど広がった。この同位相成分は分裂点近傍で最も広い周波数範囲で見られるようになった。この結果は、分裂点の近傍で見られる波が比較的に対称性の高い変動をしていることを表している。これは、写真観察から得られた定性的な結果と対応している。

ここで見られるような逆位相成分がどのような流れの機構によって現れるかは現在のところ十分な説明ができない。特に、図 11 の  $z=30\text{mm}$  の場合に見られるように、逆位相領域はノズルの近くの噴流表面でも観察されていることから、内部の乱れ構造の対称性とも関連していると考えられる。しかしながらノズル内部の乱れ構造の対称性に関する知見は十分でなく、三次元性を考慮した数値解析やより詳細なノズル内流れの計

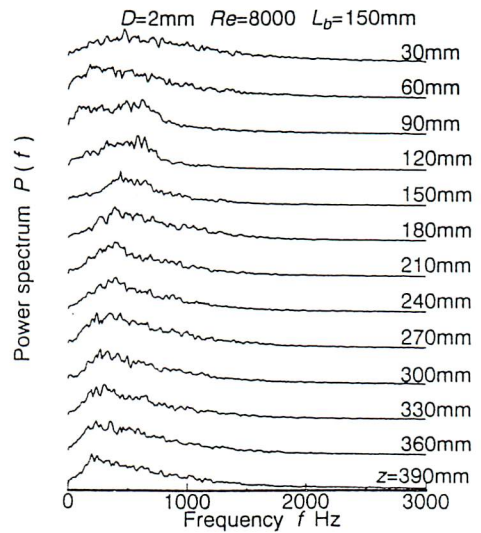


Fig.10 Frequency spectrum of turbulent liquid jet

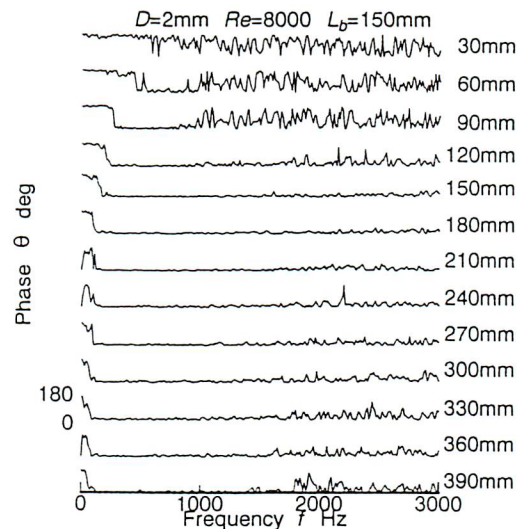


Fig.11 Phase spectrum of turbulent liquid jet

測などで噴流内部の乱れの対称性と表面波の対称性ととの関連を究明する必要がある。

また、表面波の非対称成分から対称成分への移行過程の機構は、次のように説明できる。まず、ノズルから噴出した直後の噴流は内部の乱れによって表面波が形成されるために、波のスケールも小さい。このために噴流の左右に現れる波の間に関連性がなく、それぞれの位相スペクトルがランダムになる。下流になるの

に従って、波動のスケールが大きくなる。このスケールの変化は粘性散逸による渦運動の減衰と、表面張力による不安定波の形成が主な原因であると考えられる。このようなスケールの変化に伴って、噴流の周方向に存在するいくつかの波が互いに干渉し合うようになり、対称性が高まってくる。言い換えれば、乱流噴流の表面波はノズル出口直後では、噴流内部の乱れに起因しているが、それらは徐々に減衰する。さらに、周方向の波どうしが統合されて分裂を引き起こす大きな波へと変化する。最終的な分裂の際には、液柱が大きくくびれ、図5に示すように軸対称性の高い状態へと変化する。以上のような機構によって、分裂点近傍では同位相成分が広がるものと考えられる。

以上の結果は、乱流噴流の表面波の発達過程と分裂現象との関連を考察する上で重要な結果と考えられる。

3.3 乱流噴流における逆位相領域の変化 前述のように、低周波領域に逆位相領域が現れた。この逆位相領域がレイノルズ数の変化によってどのように変化するかを調べた。図12は、分裂点において、位相スペクトルから逆位相領域と同位相領域の境界の周波数  $f_c$  を求め、そのレイノルズ数による変化を示したものである。これより、レイノルズ数  $Re$  の増加に伴って逆位相領域が高周波領域に広がるのがわかった。この原因として、液体の噴出速度が増加したために、逆位相波の通過速度が大きくなり、固定位置で観察している周波数が増加したものと考えられた。

そこで、噴出速度の変化による周波数の増加分を割り引いて考えるために、噴流の平均噴出速度  $V$  に比例する周波数をノズル径  $D$  をもとに  $V/D$  [Hz] として求め、それと  $f_c$  [Hz] との比を求めてみた。この比は、 $f_c$  を無次

元化したストローハル数  $St = f_c D / V$  となる。結果を図12中に示す。  $Re$  の増加に対して、  $St$  が若干増加する結果が得られた。この結果から、  $f_c$  の増加は主に噴出速度の増加に伴うものであるが、この速度上昇によるもの以上に、  $f_c$  が実質的に増加していることが確認できた。このように噴出速度の影響を割り引いて考えても逆位相成分が実質的に高周波数側へ拡大する（すなわち  $St$  が増加する）理由として、周囲気流との相対速度が増加することにより表面波の非対称化が促進されたことが考えられる。また、相対速度の増加により波長も減少すると考えられるから周波数が高周波側へ拡大したと思われる。さらに、もともと噴流内部の渦運動は非対称成分を持つと考えられるが、ノズル内流れが高レイノルズ数になるのにしたが、渦運動のスケールが小さくなり、非対称成分が高周波数側に遷移するものと考えられる。

#### 4. 結 論

位相スペクトルを用いることによって液体噴流表面波の非対称性を評価し、以下のことを明らかにした。

- (1) レーザシート光を平行に配し、その間に噴流を通すことによって、噴流の非対称変動を検出できるセンサーを開発した。また、その信号の位相スペクトルを用いて噴流の非対称性が評価できることを示した。
- (2) 滴下および層流噴流の場合、分裂過程や表面波の軸対称性が高い。
- (3) 乱流噴流の場合に表面波の逆位相成分が顕著に現れ、それは周波数スペクトルの主な周波数成分に比べ低周波数領域に存在する。
- (4) 乱流噴流の場合、ノズル出口近傍の表面波は対称性が低い、分裂点に近くなると対称性が増す。
- (5) 噴出速度の増加に伴って、逆位相領域は高周波数側に広がる。

謝辞 本実験を行うにあたり本学学生林田和宏君、島辺正樹君の協力を得た。ここに謝意を表す。また、本研究は文部省科学研究費補助金[奨励研究(A)]の補助を得た。ここに謝意を表す。

#### 文 献

- (1) Lord Rayleigh, The theory of sound Vol.II, Dover Publications, (1945), 351.
- (2) A.M.Sterling and C.A.Sleicher, J. Fluid Mech., 68-3, (1975), 477.
- (3) 天谷・新井, 微粒化, Vol.5-1, No.9, (1996), 13-18.

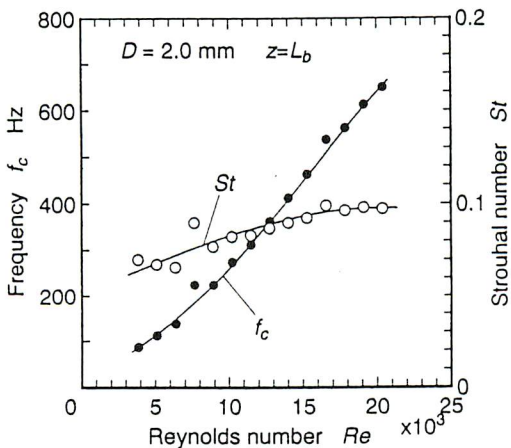


Fig.12 Effect of  $Re$  on  $f_c$



- (4) 天谷・新井, 微粒化, Vol.5-1, No.9, (1996), 19-25.
- (5) 天谷・新井, 微粒化, Vol.5-4, No.12, (1996), 178-184.
- (6) K.Amagai et. al., Atomization and Spray, Vol.7, No.5, (1997), 519-530.
- (7) K.Amagai and M.Arai, Proc. of 3rd Conf. of ILASS-Asia, Gunma, Japan, (1998), 49-54.
- (8) K.Amagai and M.Arai, Proc. of 7th Int. Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS97), Seoul, Korea, (1997), 361-368.
- (9) M.Arai and K.Amagai, Proc. of 2nd Int. Workshop on Advanced Spray Combustion, (1998), 1-15.
- (10) M.Arai and K.Amagai, Int. Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.20, (1999), 507-512.
- (11) 日野, スペクトル解析, (1983), 朝倉書店.



天谷賢児  
群馬大学・工学部・助教授  
群馬県桐生市天神町1-5-1  
Tel. 0277-30-1523  
Fax. 0277-30-1521  
略歴：1992年 東北大学  
大学院工学研究科  
博士後期課程修了  
主として微粒化のモデリング、  
微粒化機構、気液二相流、  
プラスチック廃棄物処理に関する研究



新井雅隆  
群馬大学・工学部・教授  
群馬県桐生市天神町1-5-1  
Tel. 0277-30-1522  
Fax. 0277-30-1521  
略歴：1977年 東北大学  
大学院工学研究科  
博士後期課程修了  
主として微粒化機構、ディーゼル噴霧、  
低重力・高重力場での熱伝達、  
高温燃焼に関する研究