

## 細條流の遷移と破断

佐藤 浩、斎藤博之助、中村 宏（ながれ研究集団）

### Transition and Breakdown of Fine Water Jet

H.Sato, H.Saito and H.Nakamura

Institute of Flow Research

#### ABSTRACT

The liquid jet into air has been investigated in various fields, including bubble jet printer and polymer extrusion. We made a simple, fundamental experiment. The round jet shows the random nature of breakdown. The square jet shows a twisting and early breakdown. When air is introduced into the center of a round jet, the breakdown becomes less random. The control of breakdown was possible by external sound.

key word: water jet, jet breakdown

#### 0. はしがき

小さな孔から細い水が重力によって流れ出した流れを細條流と名付けます。この流れには沢山の力が働いています。重力、表面張力、粘性、慣性力などです。これらの力で面白い流れが作られます。流れは層流から始まって、條流の太さの変動の線形成長、非線形成長、遷移、乱雑化、破断、粒落下などの色々な過程が観察できます。

この流れは我々が日常水道栓で観察していて、分かっていると思うかも知れませんが、我々は眼の中にある残像の為に瞬間的には間違った像を見ています。シャッター速度の遅い写真のようなものです。このことは細條流の集まりである滝や噴水についても言えます。我々はビデオカメラの速いシャッターの撮影でこの残像効果から逃れる事が出来ました。

この條流は色々な分野で研究され、応用されています。インクジェットプリンターではごく小さい粒子が高速で飛んでいきます。プラスチック材料の引き出しでは、重合とか相変化の過程を含んでいます。

表面張力を考慮した條流の安定の議論には Rayleigh の仕事がよく知られています。しかしそれはアカデミックなもので、実際の応用にどれほど役に立つのか分かりません。

#### 1 実験装置

細條流は内法  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  の断面で、高さが  $2\text{ m}$  ほどの透明アクリル箱の中に作られ、撮影は箱の外から行われました。この箱は外からの風を防ぐためのものです。図1はそれを示しています。

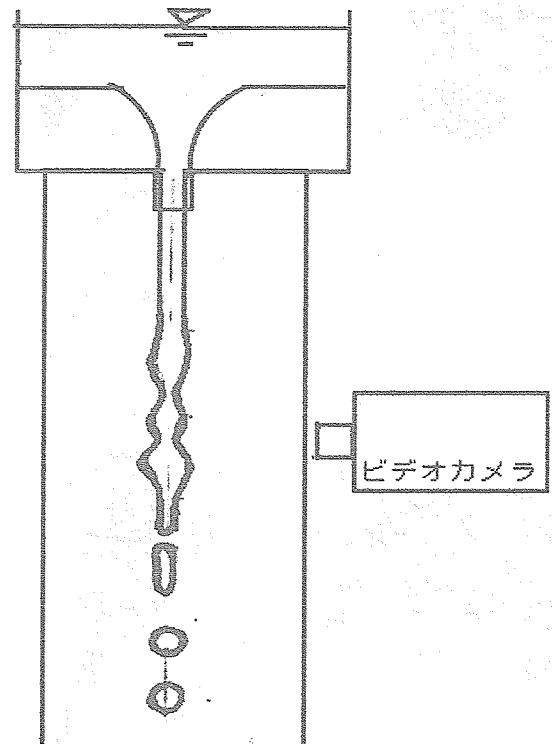


図1 実験装置

流す水は箱の上端に置いた水槽の底から供給されました。流れ込みを滑らかにするような形で、そのあとで  $50\text{ mm}$  程度の助走区間が作られています。水槽の水位の変化を時間的に追跡することで噴出流速を測定しました。水には白い水彩絵具を薄く溶いて、写真写りを良くしてあります。

撮影はデジタルビデオカメラで、シャッターは

主として1/8000秒と称するものを使いました。それによってくっきりした画像を得ることが出来ました。必要があれば鏡を使って正面、側面の両方を同時に同じ画面に撮りました。写真のコマの間隔は1/30秒で一定です。水粒の落下速度の見当は1/30秒の間に落ちる距離から推定しました。2枚の続いたコマ写真で変位が捕まえられないときは、1/250, 1/500秒のシャッターを使い、ぼけ具合を撮影して落下速度を推定しました。

## 2. 円孔

細条流で最も基本的なのは断面が円の孔からの垂下です。内径として1mm、1.5mm、2mm、3mmの4種類の孔が使われました。

層流状態では真っ直ぐで変動のない流れになります。壁で囲まれているので空気による條流への攪乱はありません。流れ方向に断面積が一定ですから断面の平均流速は一定ということになります。

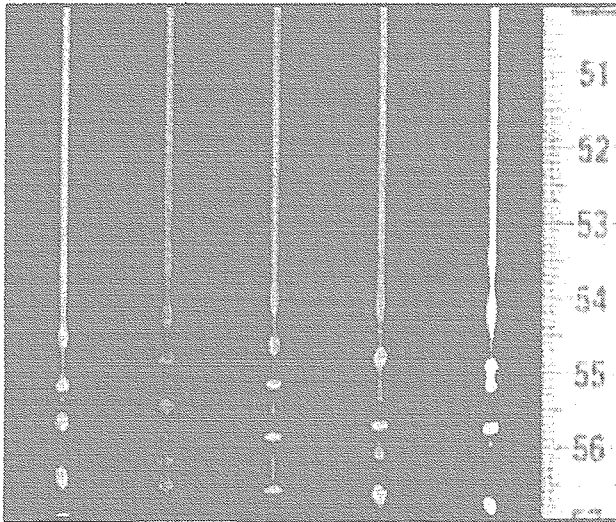


図2 1.5 mm 孔破断点付近

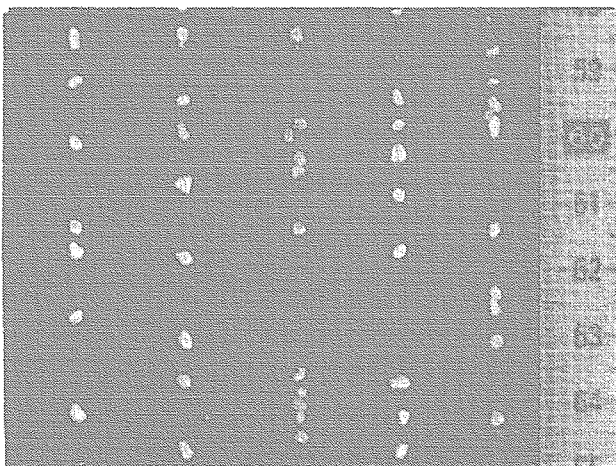


図3 1.5 mm 孔粒子群

この条流が垂下すると、やがて表面に振動が現れ、遷移に近づきます。

図2と図3は孔直径1.5mmの場合のビデオカメラのコマどりの合成です。隣り合う2本の筋の間隔

は1/30秒で、この短い時間に破断点が乱雑に変わっています。

もっと下流の図3ではばらばらの粒子群が作られています。直ぐ気が付くことは、前のコマとつぎのコマとの間には相似性がない、別の言い方では粒子群は凍結していないということです。

粒の大きさは一様ではありません。大きい粒は直径がほぼ3mmで、小さい方は1mmです。この小さい粒の発生は以前から分かっていました。satellite drop (子) です。粒の大きさが連続的にならないのは何かの機構が絡んでいるからでしょう。子の発生の原因は破断機構の違いにあります。細く引いた長い条は丸まって小さな子になるようです。

図4は吹き出し口までの助走区間の長さによる破断場所の違いを示しています。助走区間が長いほど、破断が上流に移っています。しかし助走が50mmで破断が下に移っています。これは長い助走で管流が発達したのが理由でしょう。

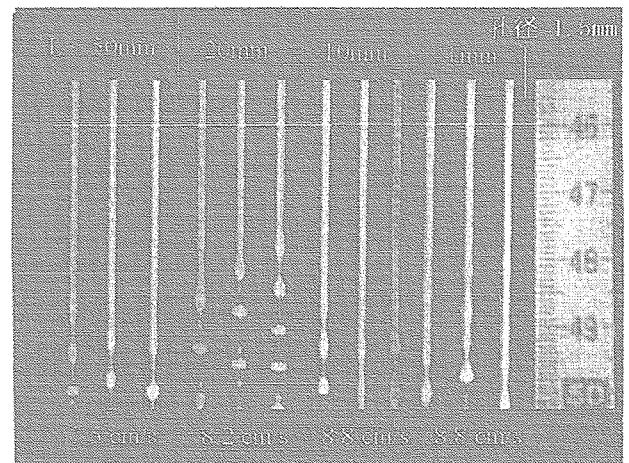


図4 助走距離による破断の変化

孔の直径が3mmになると、流出速度が上がり、レイノルズ数が大きくなって管流は乱流になって、乱流細条流を作ります。こうなると破断までの過程が違ってきます。破断の前の細条流の形には凹凸がはっきりと見えます。

円孔直径と破断場所の関係見ると直径が大きいほど破断点は下に移ります。これは洗面所での我々の経験と一致します。

## 3. 雫

孔に対する水の供給を極端に少なくすると、水は孔口に溜まり、表面張力の作用で球面状になります。供給がさらに続くと球は段々に大きくなり、やがて重力が表面張力に打ち勝って球は孔から離れ、球粒子となって落下します。すなわち雫です。

雫が孔から離れる条件を利用して水の表面張力の見当をつけることが出来ます。重力と表面張力とが釣り合うとして計算された表面張力の値は物性値の表に出ている値によく一致します。

雫では粒子と粒子の間に離れているのでビデオカメラで1つの粒子を追跡すると、落下速度を測定することができます。色々なサイズの孔を使うと、粒の大きさの違いによる落下速度の違いを見ることが出来ます。カメラは1/30秒の間隔でシャッターを切りますから粒子速度は正確に見積もれます。色々な直径の粒の落下速度を見ると、どれも真空中の自由落下と殆ど同じです。これは空気抵抗に較べて重力がうんと卓越している事からも分かります。

落下に伴って粒子がどのように変形するかも調べましたが、観測できるほどの変形はありません。

#### 4. 矩形孔

吹き口が円ではなくて、扁平な矩形の時の有様を観察しました。孔の内法断面は0.8 mm x 8 mmで、長辺と短辺の比は10です。直角方向に事柄が違うので、鏡を使って前面、側面の両方向から同時に撮影しました。それが図5です。それを見ると長軸方向へは條流が縮小して、逆に短軸方向へは拡大する、すなわち円形に近づこうとする傾向がはっきりと分かります。その拡大、縮小はオーバーシュートして下方へ繰り返します。

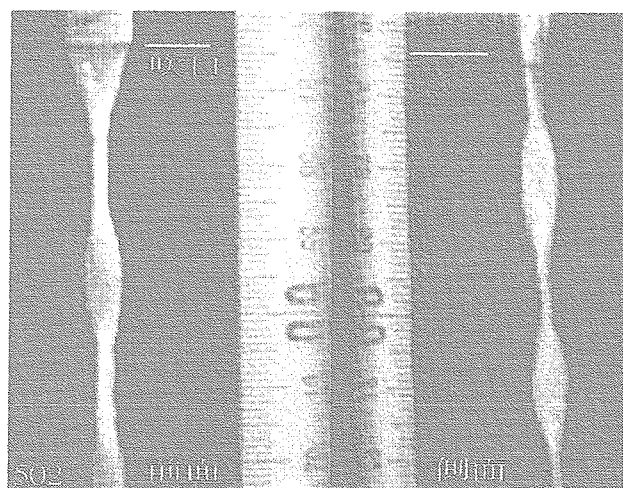


図 5 矩形孔 両面写真

これを断面積のほぼ等しい直径2 mmの円管に較べると、遷移、破断がうんと早く起きます。円孔の場合の破断点は吹き口からほぼ20 cmの下方なのに対して、矩形の場合は6 cmほどです。

#### 5. 環孔

丸い吹き口の中心部に別の丸い芯があり、水の噴き出す断面が環の形をしたところから水が垂下するという特殊な細條流の様子を観察しました。芯の部分も管になっていて、そこには空気が供給されています。すなわち、中心部には空気があり、その周りを水が取り囲んでいます。水と空気の流量は独立して変えることが出来ます。その流量の比によって流れが強い影響を受けます。まず空気の流速が水の流速に較べて小さい場合が図6です。層流部分は殆ど

無く、遷移点も破断点も固定しています。

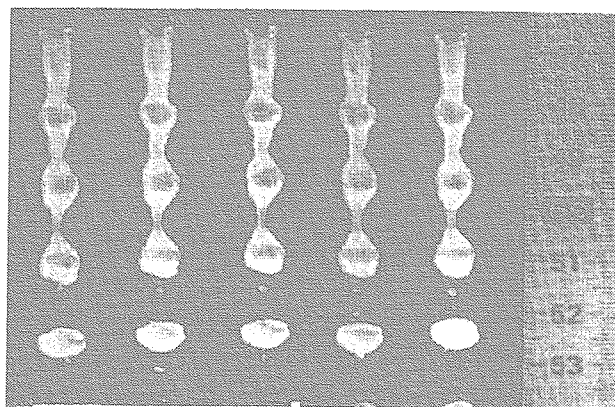


図 6 環孔 空気 280 cm/s 水 430 cm/s

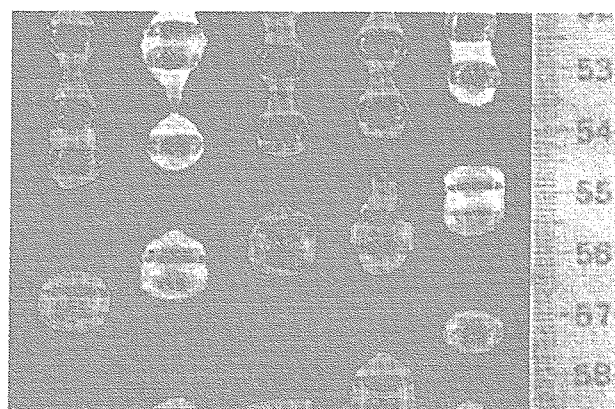


図 7 環孔 空気 830 cm/s 水 430 cm/s

図7は空気流速が水の流速を大きく上回る場合で、泡の膨れ上がりも少し違っています。破断点は必ずしも揃わず、破断の有様にも乱雑が入っています。粒子の大きさも、落下速度も揃いません。

両方の速度が同程度の時は遷移と破断は吹き口のすぐそばで起こります。しかもその有様には再現性があり、乱れは弱くなっています。出来上がったシャボン玉も寸法が揃い、落下速度も揃っています。

#### 6. 考察

上方にある貯水槽の底に穴が開いていて流れ出る條流は最初は綺麗な層流を保ちます。やがて表面に凹凸が発生します。その振幅は初期にはきわめて小さく、線形の考え方を許します。やがて凹凸の振幅が大きくなると非線形の関係になります。これが遷移です。凹凸がさらに発達して流の中に非常に細い部分が出来ると、そこで破断が生じて流は切れ、切れた円筒状の部分は表面張力によって球状になって落ちていきます。

吹口直径1.5 mmのとき、吹口での平均流速は0.6 m/sの程度です。これが垂下の初期に縮流して、速度は1 m/sとなると見られます。これ以後は大きな加、減速は無く、破断点まで続きます。

表面張力波の非線形成長によって破断直前の細條直径は0.3 - 0.4 mmで、これに相当する流速は最大で2 m/sの程度と見積もられます。

一方で画像から見積もられた破断後の粒子の速度もほぼ  $2 \text{ m/s}$  で、この点での一致はよいようです。

粒子の落下速度は破断したときの條の直径で決まり、ここに乱雑さが現れます。粒の落下速度は決って一様ではありません。おそらく破断の時の初速度の違いで落下速度が変わるのでしょう。

破断は條流表面の表面張力波の非線形成長に伴う條流の直径の減少によるものです。しかし細くてもまだつながっている時に、どこが最初に切れるかによって、発生した粒の行動に大きな影響があります。切れる場所によって、子の発生の仕方が大きく変わります。上の方で切り放されると、細い部分は吸い込まれ、表面張力による真球化によって大きな粒になります。下の方で切れると、小さな部分は切り離されて、子となるように見えます。どこで切れるかは確定しません。これが乱雑化の原因でしょう。

條流が破断する長さは1ヶあたり  $1 \text{ cm}$  ほどと見積もられます。落下速度を  $200 \text{ cm/s}$  とすると、破断の周波数は  $200 \text{ Hz}$  となります。1コマ1/30秒のムービーでは1コマの画像は数回の破断の内の1つにすぎないのです。

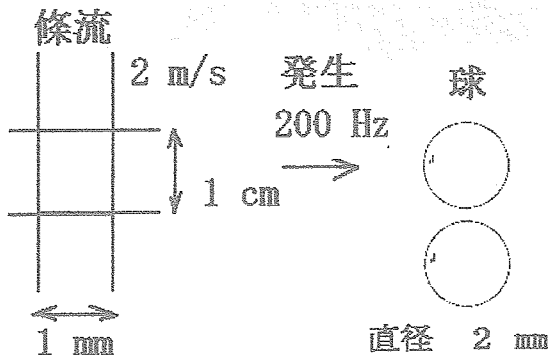


図8 破断モード

直径  $1 \text{ mm}$  の條流の  $1 \text{ cm}$  が切れて、丸まって、球になるとすれば球の直径は  $2 \text{ mm}$  ほどです。その関係が図8です。この球の  $200$  ヶが1秒間に放り出されていることになります。

乱雑な破断には3つのモードがあります。

1. 破断点の乱雑な上下。
2. 破断後の速度のバラツキ。
3. 破断点が上下し、粒子の速度にもバラツキ。

これらのどれが卓越するのかはよく分かりません。何故破断後の速度がばらつくのかという機構もよく分かりません。

遷移と破断を外部から制御することを試みました。適切な制御によってこれらのバラツキを変えることが出来そうです。

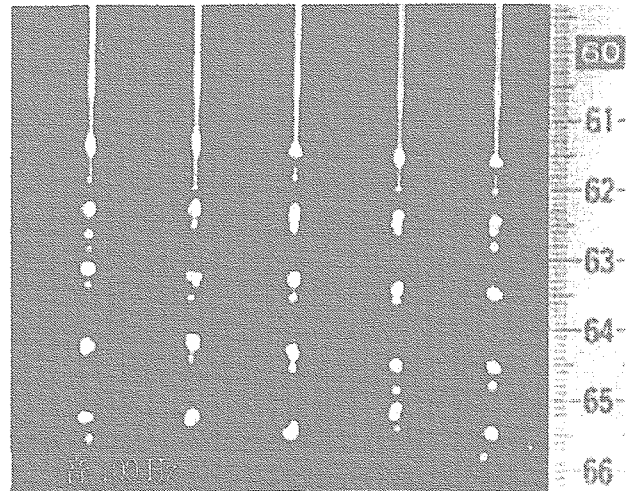


図9 音励起 破断

簡単なやり方は音を送り込むことです。吹出管を長く ( $270 \text{ mm}$ ) してスピーカーから十分に強い音を送り込んでみると、 $100 \text{ Hz}$  付近で強い反応がありました。破断点が前進して、しかも時間的に綺麗に揃っています。破断点の位置は自然破断の最も上流の位置にほぼ一致します。これは完全な励起です。図9は  $100 \text{ Hz}$  の音を送ったときのものです。

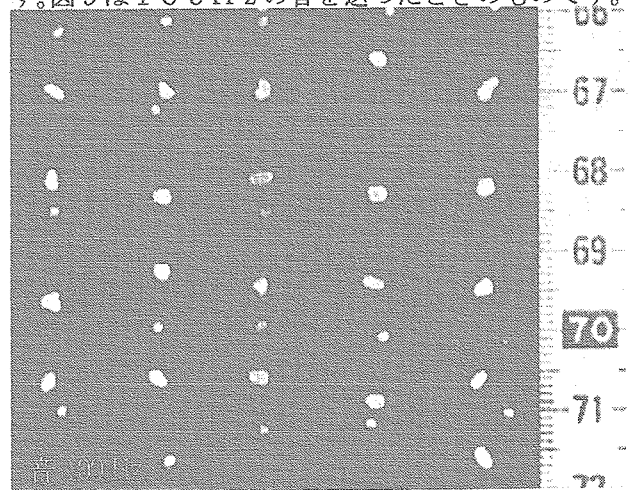


図10 音励起 粒子群

図2に比べると音の効果が分かります。粒子群の写真が音無しの図3と、音有りの図10を比べてみると、音があると粒子群はよく揃っています。調べてみると、この励起は吹出管の振動によるものであることが確認できました。吹口は  $0.3 \text{ mm}$  程度の振幅で動いています。この振動は音によるものであるのに疑いはありません。自然破断の場合にも吹き口が全く振動しないという保証はありません。ひょっとしたら認められない程度の小さな振動が、遷移と、破断に影響しているのかも知れません。

考えてみると細條流については、やることがまだまだ沢山あるようです。