

# 自由落下型と越流型の落水表情についての 実験的研究

逢澤正行<sup>1</sup>・篠原 修<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 日本国土開発株式会社 土木本部 (〒107-8466 東京都港区赤坂4-9-9)

東京大学研究員 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

<sup>2</sup>フェロー 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

自由乱流の重力噴流に属する自由落下型落水表情と壁面乱流の開水路急変流に属する越流型落水表情の両者について、レイノルズ数の連続的变化に伴う自由表面の断続的形態変化が、自由表面の安定問題となる第1領域、遷移領域である第2領域、全体が乱れる第3領域の不連続な3領域に区分できることを実験的に求め、その境界値を無次元量によって示した。また、第1領域において、自由表面の安定問題が微小擾乱の成長問題となり、自由落下型の場合には表面張力が、越流型の場合には重力が、微小擾乱に対抗する復元力として作用することを示した。

**Key Words** : *texture of falling water, free surface, free falling type, slope falling type, hydraulics mechanisms*

## 1. はじめに

### (1) 背景と目的

落水表情は自由表面の形態的特徴に関するものであり、大別して、自由乱流の重力噴流に属する自由落下型落水表情と壁面乱流の開水路急変流に属する越流型落水表情がある。これら落水表情は、意図的にデザインされた公園の滝や、非意図的ではあるが美しい表情を見せる堰、落差工等の公共構造物のいたる所に見られ、日常生活に潤いを与えてくれるとともに、我々日本人の美意識を担う代表的な要素の一つである。にもかかわらず、その理論的解析はもとより、そのデザイン方法論を工学的に体系化したものは未だ存在せず、流れのデザインにおいてはデザイナー個人の経験や事例毎に模型実験によって仕様を決めているのが現状である。

ここで、自由落下型に関連する既往の研究としては、Yorkら<sup>1)</sup>、Hagertyら<sup>2)</sup>、Chenら<sup>3)</sup>が放水脈の安定問題を扱っているが、それらは主として機械分野における水脈の分裂についての強制振動によるばらけに関するものであり本研究で扱う内部擾乱によるばらけとは異なる。尚、本論文において「ばらけ」とは、水脈が不安定になり水滴に分散する現象(Break-Up)を意味する。アーチダムから自由落下するナップの形状については、坂本ら<sup>4),5)</sup>の研究

があるが、一定の流量についての現場観測または2次元の断面形状についての考察にとどまっている。

越流型に関連する研究として岩佐ら<sup>6),7)</sup>が転波列を扱っているが、それらは土砂のはく離や輸送についての一次元流れ・最終状態の解析に関するものであり本研究で扱う二次元流れ・発達状態とは異なる。

尚、水の表情の形成要素としては、水面形と気泡混入とがあり、本研究で扱うのは前者で、後者については乱流境界層との関係でChanson<sup>8)</sup>の研究がある。

著者ら<sup>9),10)</sup>は、既往の水理経験式を組み合わせることにより落水表情を予測する手法を提案したが、この方法論ではそれらの経験式が落水表情の予測を考慮したものでない点で限界があり、落水表情の予測には、実規模実験による基礎データの収集とCG(コンピュータグラフィックス)による再現が必要であると考えた<sup>11),12)</sup>。

そこで、本研究の目的は、実規模実験を実施することにより自由落下型と越流型の落水表情の形態的特徴を現象的に把握するとともに落水表情の全体としての連続的变化を説明するような理論的な枠組みについて考察することにある。



図-1 落水表情の水理学上の分類

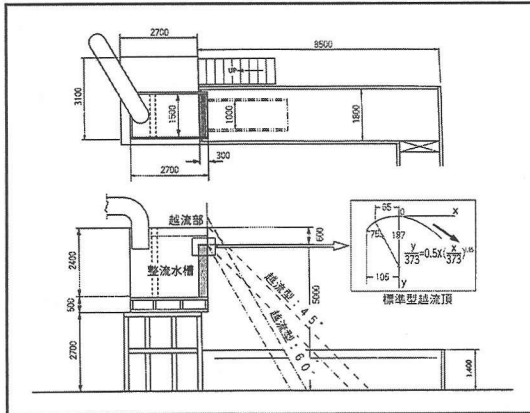


図-2 実験装置緒元

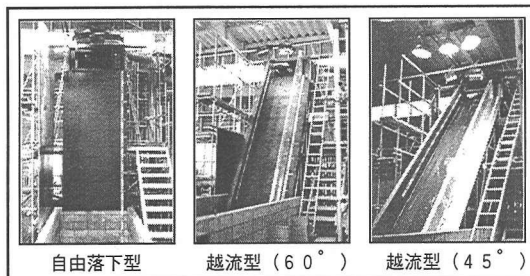


図-3 実験装置概観

## (2) 落水表情の水理学上の分類

水理学的観点から落水表情を分類すると、図-1に示すように、水脈が固定床によって支持されていない自由落下型と固定床によって支持されている越流型、そして、その中間形態に分類することができる。自由落下型については、水膜として落下している水膜型と水束の形で落下している水束型に分類することができるが、基本となるのは、水膜型の方である。両者の違いは水束型においては流軸直交方向の波が円周方向に繋がっている点にある。このため、背面の空気層と放出部の振動の影響を無視できるものとし、水束の直径と厚さが等しい水膜とを比較すれば、水束型の方が水膜型よりも不安定になりやすいと考えられ、それに伴って後述するばらけ位置がより短くなっていくものと考えられる。同様に、越流型についても、越流型と緩勾配型が考えられるが、両者の違いは越流型では流れの発達過程が問題になるのに対して緩勾配型では流れの均衡状態が中心となる点にある。また、自由落下型と越流型の中間形態については、構造物の形態としては越流型であるが放出時の流速が速いため自由落下型に近い形態で落水しているものである。著者らは、一般にダム放流時のホワイトウォーターと呼ばれているものの一部がこの中間形態に該当していることを現地観測によって確認している。今回は、その最も基本的な形態である水膜型の自由落下型と越流型の2者を研究対象として選択した。

## 2. 実験概要

### (1) 実験装置

既往の設備で、本研究の目的を充たすような実験装置は存在しない。そこで、以下のような仕様で大規模実験装置を製作した。(図-2、図-3)

実験装置の基本諸元

落差：5.0m

流量：最大使用水量 $0.5\text{m}^3/\text{s}$

落水形式：越流型、自由落下型

越流諸元

自由落下型：幅1.0m、1.5m

越流型：幅1.0m × 勾配 $45^\circ$

越流型：幅1.0m × 勾配 $60^\circ$

#### a) 自由落下型実験装置

パイプ架台 (B3.1m × L2.7m × H2.7m) の上に、整流水槽 (B1.5m × L2.7m × H1.8m) を設置した。給水管は $\phi 300$ 配管を2本とし、流量計 (ベンチュリメーター) と調節弁を使用して給水した。着水

表-1 実験ケース一覧

自由落下型	F-A-1~40, F-B-1~40, F-C
越流型 (45°)	S45-A-1~40, S45-B-1~40, S45-C
越流型 (60°)	S60-A-1~40, S60-B-1~40, S60-C

F: 自由落下型, S: 越流型, 1~40: 0.003~0.500m<sup>3</sup>/s/m, AとB: 段階的流量変化, C: 連続的流量変化

表-2 写真撮影およびVTR撮影

1) 写真撮影 (段階的变化)	
機材	CONTAX G1+Carl Zeiss Biogon28mm F2.8
撮影方向	正面, 側面, 斜め側面, 上面
シャッタースピード	1/60, 1/500, 1/1000
フィルム	Kodak Super Gold 400, 36枚撮り80本

2) VTR撮影 (段階的变化および連続的变化)

機材	SONY CCDVX1
撮影方向	正面, 側面, 斜め側面, 上面
シャッタースピード	1/60, 1/100, 1/500, 1/1000, 1/2000
ビデオテープ	SONY Hi8 ME120, 120分テープ 18本

(3) 水の物性

実験期間における実際に使用した水温の平均は約15°Cであることより, 水の動粘性係数を $1.15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 表面張力係数を $7.35 \times 10^{-2} \text{N/m}$ , 単位体積重量を $1000 \text{kg/m}^3$ とした. 流水は内径300mmの配管2本を通し貯水槽と実験装置との間で循環させた.

(4) 実験方法

a) 実験ケース

表-1に実験ケース一覧を示す. 実験は段階的に流量を変化させたものと連続的に変化させたもので行った. 前者については $0.003 \sim 0.500 \text{m}^3/\text{s/m}$ の範囲で各段階で流量を安定させた計測を40段階で2回繰り返した. 後者については約5分間で $0.003 \text{m}^3/\text{s/m}$ から $0.500 \text{m}^3/\text{s/m}$ まで連続的に流量変化させて計測を行った. ここで, 本論文で用いた実測値は主として前者のものであり, 後者については表情変化の境界値の特定の副資料として用いる目的と連続した画像データを得る目的で収集した. 尚, 同一の実験条件では2回の段階的流量変化と連続的流量変化とで結果に違いはなかった.

b) 写真撮影およびVTR撮影

計測項目としては, 表-2および図-4に示すように, 流量変化に対する落水表情の写真撮影とVTR撮影を行った. 写真は総てフォトCDの形でデジタル化し, VTRの結果についても必要な範囲で1秒間30枚の画像としてデジタル分解しコンピュータに入力した. 尚, 写真撮影およびVTR撮影においては落水表情の画像と同時に定規(1m間隔, 10cm間隔, 1cm間隔)が写るようにし, 画像データ

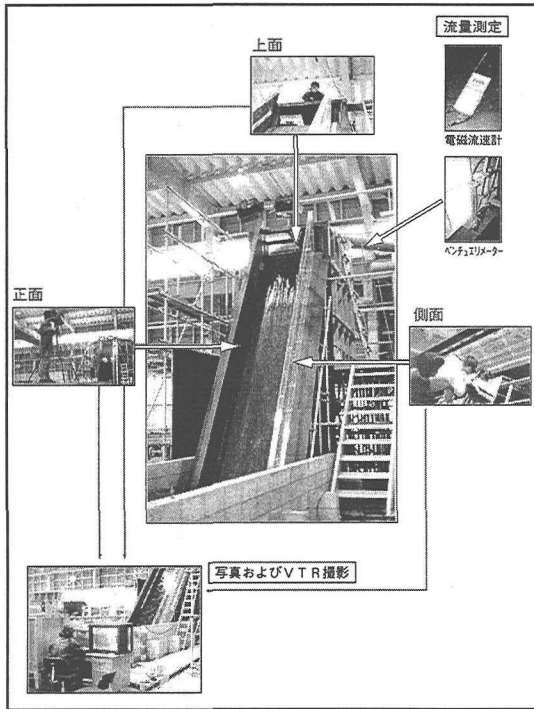


図-4 計測方法

部はブロック積み水路とした. 落水部は, 標準型越流頂とし, 幅1.5mの越流部から自由落下水脈が形成される構造とした.

b) 越流型実験装置

自由落下型落水装置に45°および60°の勾配を持つ幅1.0m×深さ0.45mのシュート部を付加することで越流型の実験装置とした. 実験は勾配45°のケースを先行して実施し, その後, 勾配60°のシュートに改造して実験を行った.

(2) 実験場所および実験期間

実験場所:

日本工営株式会社中央研究所 水理実験棟内

実験期間:

1995年10月30日~12月20日

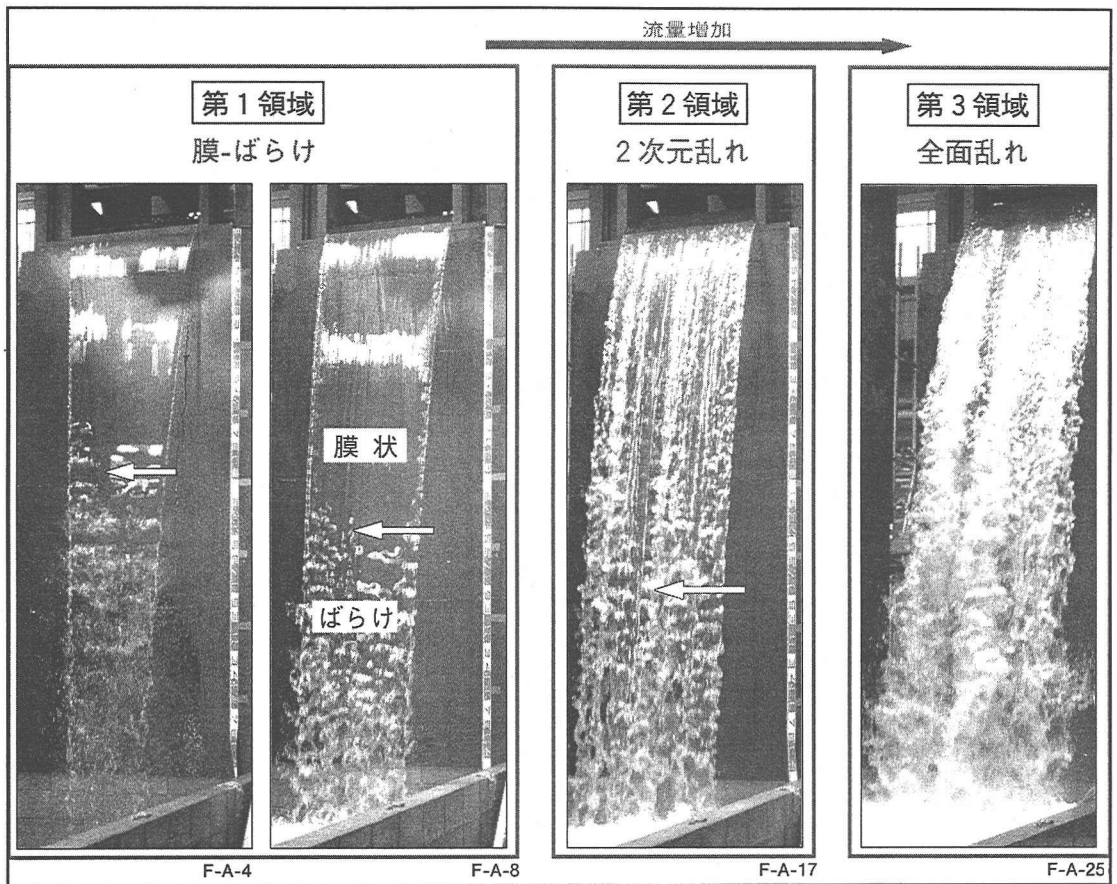


図-5 自由落下型落水表情  
(図中の矢印は、ばらけの境界位置)

から直接的に長さのデータを計れるようにした。

### c) 流量測定

流量はベンチュリメーターにより、また、調整弁に取り付けた電磁流速計により測定した。

### (5) 物理量と無次元量の定義

本論文で用いる物理量と無次元量を次のように定める。

- $q$  : 単位幅流量 ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )
- $U$  : 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )
- $B$  : 水路幅 ( $\text{m}$ )
- $H$  : 水深 ( $\text{m}$ )
- $A$  : 流積 ( $BH$ ) ( $\text{m}^2$ )
- $S$  : 潤辺 ( $B+2H$ ) ( $\text{m}$ )
- $R$  : 径深 ( $A/S$ ) ( $\text{m}$ )
- $a$  : 自由落下型におけるばらけ位置の水脈の厚さ ( $\text{m}$ )
- $L$  : 越流頂よりばらけ位置までの距離 ( $\text{m}$ )
- $g$  : 重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
- $\nu$  : 動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $\rho$  : 水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $\sigma$  : 表面張力係数 ( $\text{N}/\text{m}$ )
- $Re$  : レイノルズ数 ( $UR/\nu$ )
- $We$  : ウェーバー数 ( $\rho aU^2/\sigma$ )
- $Fr$  : フルード数 ( $U/\sqrt{gH}$ )

ここで、落水表情の境界値を示す $Re$ の算出には自由落下型と越流型で条件を等しくするため、放出口である越流頂における流速 $U$ と径深 $R$ を用いた。また、自由落下型において水脈が膜状に落下している場合のばらけ位置 $L$ における水脈の厚さ $a$ は、背面の空気層が解放されていることから、水脈の自由落下を前提にばらけ位置 $L$ の流速 $U$ を算出し、この値と水路幅 $B$ の積で単位幅流量 $q$ を除することによって求め、ばらけ位置 $L$ におけるウェーバー数 $We$ の算出に用いた。

## 3. 実験結果および考察

### (1) 自由落下型落水表情

流量の増加に伴い自由落下型における落水表情は図-5に示すような3つの領域に区分された。

a) 流量増加に伴いばらけ位置が下降する領域

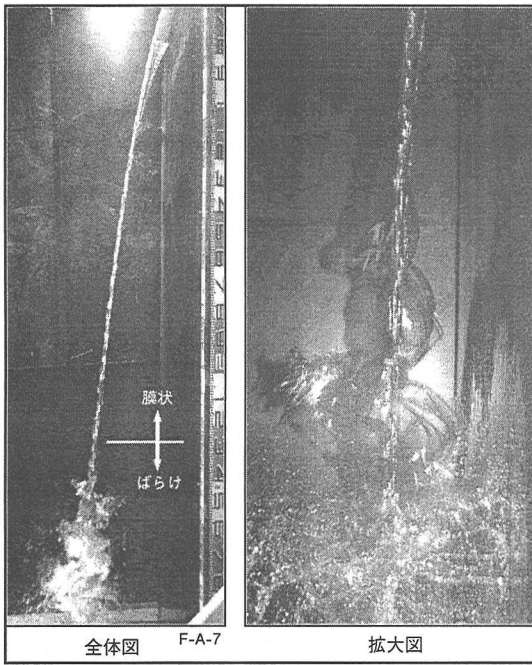


図-6 自由落下型におけるばらけ状況  
(側面より撮影)

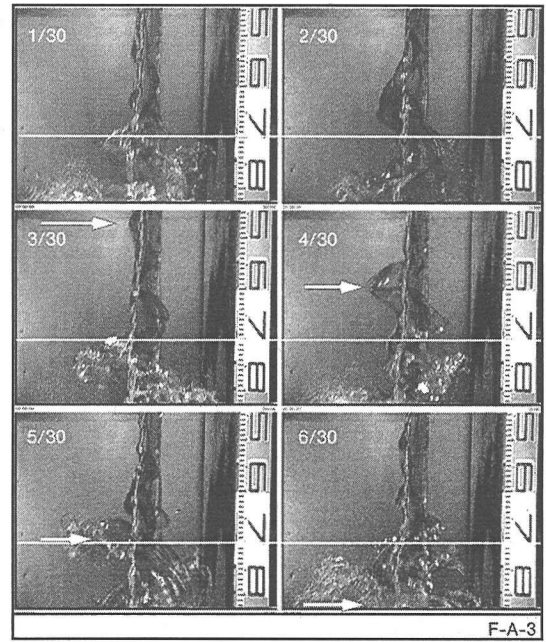


図-7 微小擾乱の成長状況  
(图中、横線はばらけ位置、矢印は同一ポイント)

表-3 自由落下型落水表情実験結果 (第1領域および第2領域)

case	$q$ (m <sup>3</sup> /s/m)	$Re$	$L$ (m)	$a$ (m)	$L/a$	$We$
F-A-1	3.10E-03	2.63E+03	1.32	6.09E-04	2.17E+03	2.15E+02
F-A-2	4.40E-03	3.71E+03	1.51	8.08E-04	1.87E+03	3.26E+02
F-A-3	5.30E-03	4.45E+03	1.70	9.17E-04	1.85E+03	4.17E+02
F-A-4	7.00E-03	5.83E+03	1.85	1.16E-03	1.59E+03	5.74E+02
F-A-5	8.10E-03	6.72E+03	1.98	1.30E-03	1.53E+03	6.88E+02
F-A-6	1.20E-02	9.87E+03	2.22	1.82E-03	1.22E+03	1.08E+03
F-A-7	1.45E-02	1.18E+04	2.32	2.15E-03	1.08E+03	1.33E+03
F-A-8	1.65E-02	1.34E+04	2.40	2.40E-03	1.00E+03	1.54E+03
F-A-9	1.89E-02	1.52E+04	2.54	2.67E-03	9.50E+02	1.82E+03
F-A-10	2.50E-02	1.99E+04	2.62	3.48E-03	7.53E+02	2.44E+03
F-A-11	2.66E-02	2.11E+04	2.65	3.68E-03	7.20E+02	2.62E+03
F-A-12	2.72E-02	2.15E+04	2.30	*	*	*
F-A-13	2.93E-02	2.31E+04	2.35	*	*	*
F-A-14	3.14E-02	2.46E+04	2.40	*	*	*
F-A-15	4.23E-02	3.23E+04	2.46	*	*	*
F-A-16	5.08E-02	3.80E+04	2.49	*	*	*
F-A-17	6.81E-02	4.95E+04	2.60	*	*	*
F-A-18	1.02E-01	7.05E+04	2.60	*	*	*
F-A-19	1.49E-01	9.70E+04	2.60	*	*	*
F-A-20	2.00E-01	1.24E+05	(2.60)	*	*	*

- ・ F-A-1からF-A-11までが第1領域, F-A-12からF-A-19までが第2領域, 両者の境界は明確に現れる。
- ・ 第2領域では水脈に乱れが含まれるため,  $a$ および $We$ の値は求めている。
- ・ 第2領域と第3領域の境界は不明確であり, F-A-20では目視でばらけ位置を確認できず高速撮影において不明確ながら識別できる程度であるためF-A-19を境界とした。F-A-20以降は高速撮影においても識別できなかった。

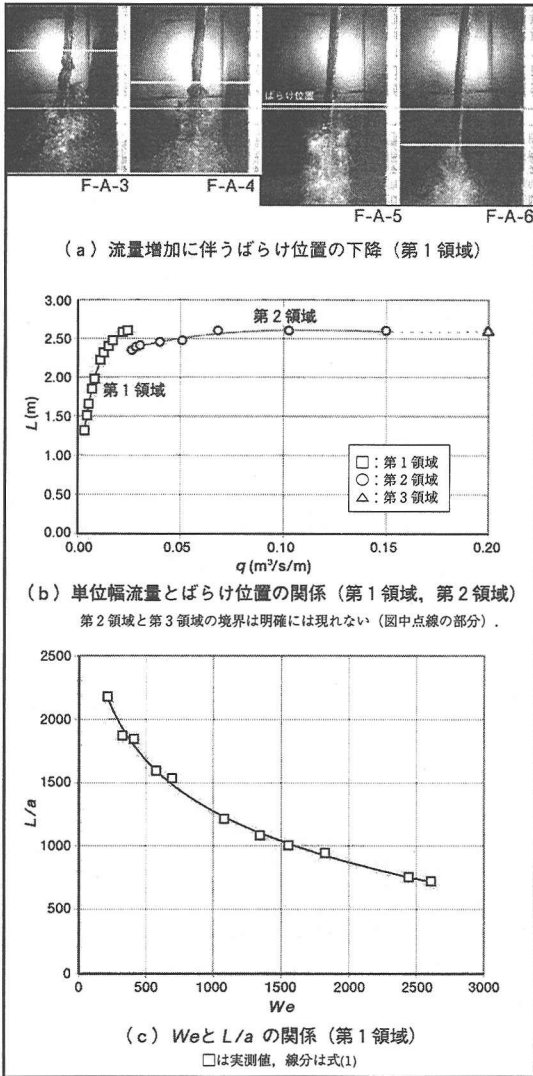


図-8 流量変化とばらけ位置の関係

- b) 流量増加にかかわらずばらけ位置が一定の領域 ( $Re = \text{約} 2.2 \times 10^4$  以上)
- c) 全体が瀧状となりばらけ位置の識別困難な領域 ( $Re = \text{約} 1.0 \times 10^5$  以上)

それぞれの領域をその形態的特徴に応じ、膜-ばらけ (第1領域)、2次元乱れ (第2領域)、全面乱れ (第3領域) に分類した。

a) 第1領域: 膜-ばらけ

図-6に示すように、第1領域においては、膜状とばらけが明確に区分される。これは、第1領域の形態が自由表面の安定問題に起因することによると考えられる。この領域においては、安定して落下していた水脈がばらけ位置で一気に不安定となってい

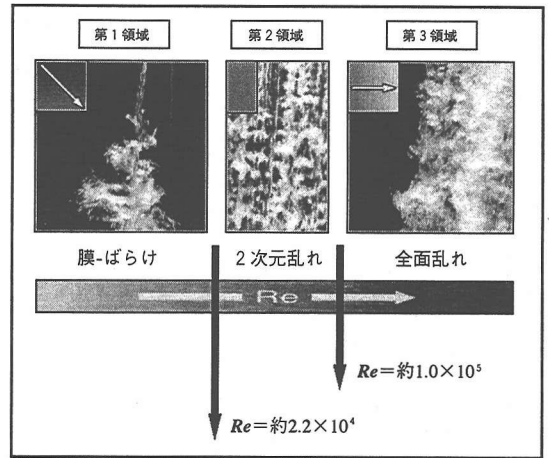


図-9 自由落下型落水表情と $Re$ との関係

ることが確認される。これはばらけ位置において慣性力と表面張力による復元力とのバランスが崩れ擾乱が脈状振動の形で指数関数的に増幅していくことによるものと考えられる。

図-7は、側面からのVTRデータを1秒間30枚のデジタル画像に分解したものを順番に並べたものであり、微小擾乱が成長し、ばらけに至る過程を明確に示している。ここで、自由落下型のばらけ位置の特定については、実験中の目視によるもの (動画) およびビデオ画像の分解によるもの (静止画) の2種類を行い、次の定式化には、側面より撮影したVTRデータ (シャッタースピード: 1/1000) の100コマ分 (100/30秒分) の静止画から計測した値を平均化して用いた。表-3に第1領域および第2領域についての実験結果を示す。

図-8(a)は、流量増加に伴うばらけ位置の下降の例を示す。図-8(b)は、その経過をプロットしたものである。横軸は単位幅流量、縦軸は越流頂よりばらけ位置までの距離である。ここで、前述したように、ばらけを自由表面の安定問題と考え、慣性力と表面張力の比であるウェーバー数 $We$ によって越流頂よりばらけ位置までの距離 $L$ を無次元化した形で表すと次式となる。

$$L/a = -5.57 \times 10^2 \ln(We) + 5.14 \times 10^3 \quad (1)$$

ここで、 $a$ はばらけ位置の水脈の厚さである。本式の適用上限は $Re = \text{約} 2.2 \times 10^4$ であり、この値を越えると流れは第2領域に移り、ばらけ位置はほぼ一定となる。また、水脈が安定して膜状で落下できる下限は越流頂より約2.7mである。図-8(c)に $We$ と $L/a$ の実測値と式(1)の関係を示す。

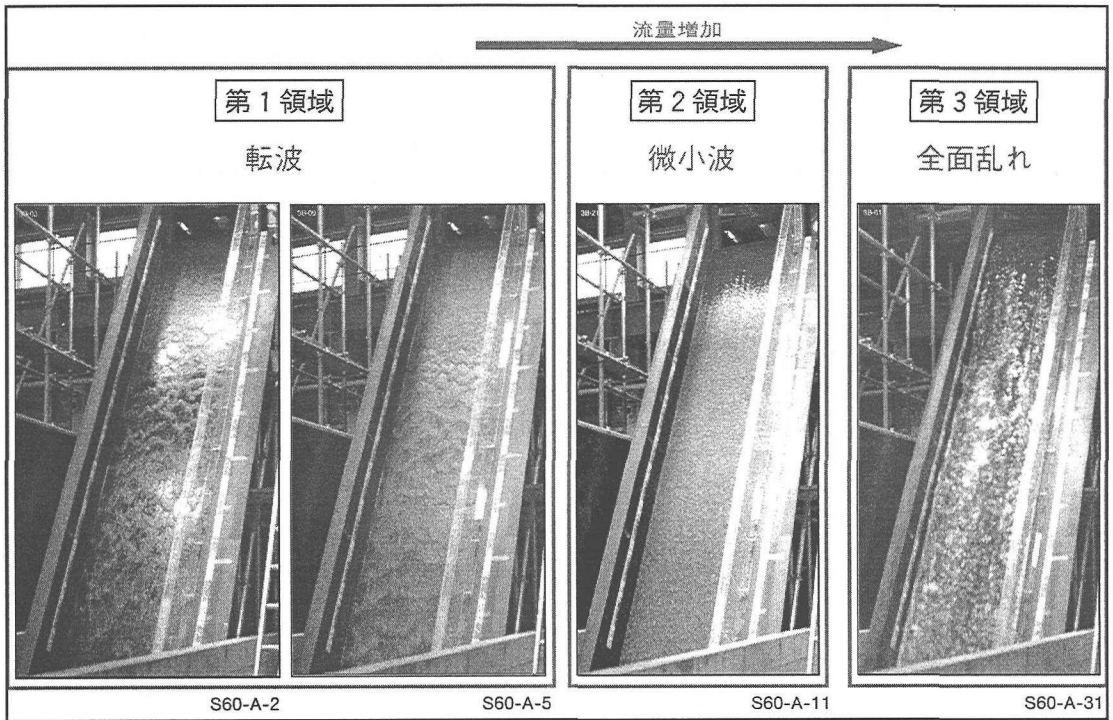


図-10 越流型落水表情

b) 第2領域：2次元乱れ

$Re$  = 約 $2.2 \times 10^4$  から  $Re$  = 約 $1.0 \times 10^5$  までの第2領域は、遷移領域であり、水脈に対して平面的（2次元）に乱れが加わることから「2次元乱れ」とした。この領域においても、水脈のばらけは明確に識別可能であり、第1領域との形態的な違いは、ばらけ境界位置に到る水脈が膜状ではなく乱れを含んでいる点と図-8(b)に示すように流量変化によってばらけ位置がほとんど変化しない点にある。尚、第1領域から第2領域に遷移する際には、安定した水脈全面に乱れが生じ不安定となるため、ばらけ位置までの距離  $L$  は減少する。

c) 第3領域：全面乱れ

$Re$  = 約 $1.0 \times 10^5$  以上の第3領域においては、全面に乱れが発生した。この領域においては、図-5に示すように、前2領域のような水脈の途中におけるばらけを明確に識別することはできず、全面が白濁した水脈の状態で落下した。上面からのVTR撮影により、越流頂の裏面よりの空気混入が観測された。尚、第2領域と第3領域との境界は、水膜が乱れを含んでいることから、第1領域と第2領域の境界のように明確には現れない。

以上より、形態的観点から自由落下型における表情変化の特徴をまとめたものが、図-9である。

(2) 越流型落水表情

越流型においても流量の増加に伴い落水表情は図-10に示すような3つの領域に区分された。

a) 転波が発生する領域

b) 全体が均質な波形となる領域

( $Re$  = 約 $1.5 \times 10^4$  以上)

c) 表面の乱れが顕著になる領域

( $Re$  = 約 $3.0 \times 10^4$  以上)

それぞれの領域をその形態的特徴に応じ、転波（第1領域）、微小波（第2領域）、全面乱れ（第3領域）に分類した。

a) 第1領域：転波

第1領域においては、自由表面の安定問題となり、転波が発生し流量増加に伴い微小波が被っている。ここで、自由落下型では膜状とばらけとの境界位置が明確に現れ、それがウェーバー数の関数として数式化されたが、越流型においては、転波に対して微小波が連続的に被さってくることより自由落下型と同様の方法での数式化は意味を成さない。尚、転波の一次元流れとしての最大流量、最大摩擦速度等の特性については、前述の岩佐ら<sup>6), 7)</sup>の研究がある。

b) 第2領域：微小波

$Re$  = 約 $1.5 \times 10^4$  から  $Re$  = 約 $3.0 \times 10^4$  までの第2領

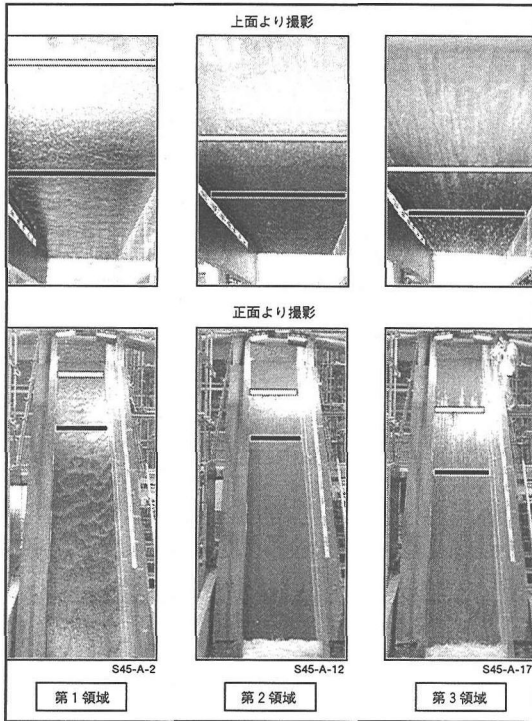


図-1 1 乱流境界層の成長状況  
(上線は層流域と遷移域の、下線は遷移域と乱流域の境界)



図-1 3 自由落下型と越流型の比較

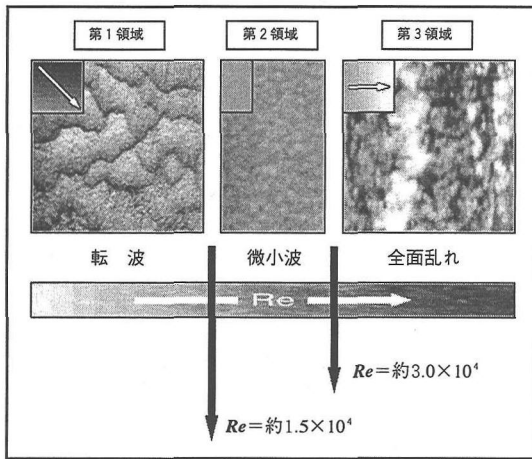


図-1 2 越流型落水表情とReの関係

域は、遷移領域であり、第1領域にみられるような表情変化はほとんどなく、全面が均質な微小波によって覆われる。

c) 第3領域：全面乱れ

$Re = \text{約} 3.0 \times 10^4$  以上の第3領域においては、全面

が乱れてくる。第2領域が微小波で均質に覆われるのに対し、第3領域では自由表面の乱れが増加してくる。

尚、傾斜 $45^\circ$ と $60^\circ$ で境界のレイノルズ数はほとんど変わらなかった。

越流型においては、放出部における層流域、遷移域、乱流域の区分が明確に表情として現れている。図-1 1より、流量の増加に伴い乱流境界層が自由表面に到達するまでの距離が増加してきていることが解る。この現象は $Re = 10^6$ 付近までは続くが、それ以上のレイノルズ数では流れの乱れの影響の方が大きくなり一定の値を中心にとばらつきを示し出す。同図は第1領域、第2領域、第3領域について、正面より撮影したものと上面より撮影したものに層流域と遷移域との境界および遷移域と乱流域の境界を示したものである。

以上より、形態的観点から越流型における表情変化の特徴をまとめると図-1 2のようになる。

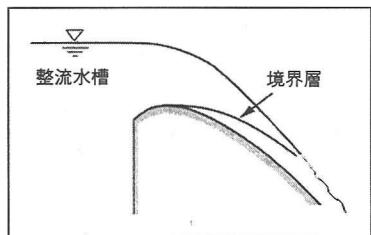
(3) 自由落下型と越流型の比較

以上の結果より、図-1 3に示すように、自由落



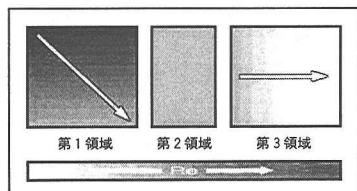
a) 放出部での層流域、遷移域、乱流域の発生

レイノルズ数から考えればほぼすべての落水表情は乱流域に属するが境界層を考慮すれば放出部においては層流域及び遷移域が存在する。



b) 乱流域における流量変化 (Re変化) に伴う表情変化

自由表面の安定問題となる領域 (第1領域)、全面が乱れる領域 (第3領域)、その間の遷移領域 (第2領域) の区分。



c) 第1領域における自由表面の安定問題

乱流域の中で流量変化に伴う表情変化が発生する  
第1領域について考察する。

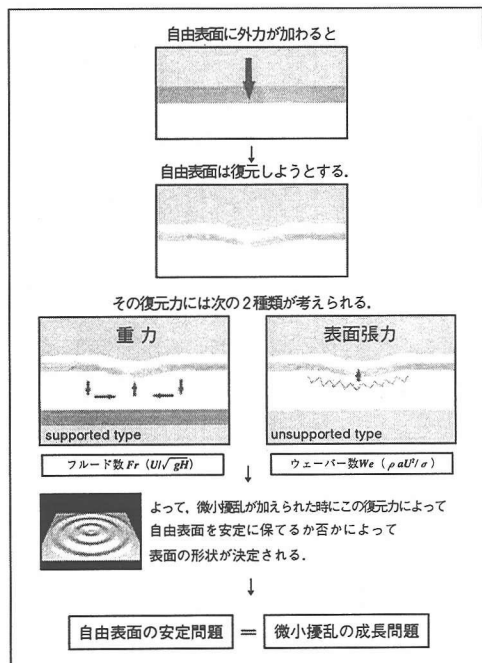


図-14 落水表情のメカニズム-1

下型と越流型で具体的な形態とその境界値は異なるが、全体として3つの領域に区分することが可能である。

ここで、自由落下型が自由乱流の重力噴流であるのに対し越流型が壁面乱流の開水路急変流であることより、両者の乱流構造およびそれに基づく自由表面の形態は明らかに異なるはずであるにもかかわらず同様の傾向を示していることより、両者は乱流としての共通のメカニズムを有しているのではないかと考えられる。

各領域の比較としては、

a) 第1領域：自由表面の安定問題となる領域

自由落下型では、膜-ばらけの境界位置が変化することに対し、越流型では、転波に対する微小波の被さり方が変化する。これは、自由表面の復元力として働く物理量の違いによるものと考えられる。

b) 第2領域：遷移領域

自由落下型では、ばらけ位置が一定に保たれるのに対し、越流型では均質な微小波が維持される。

また、遷移域のレンジが自由落下型で  $Re = \text{約} 2.2 \times 10^4$  から  $Re = \text{約} 1.0 \times 10^5$  までなのに対して、越流型では、 $Re = \text{約} 1.5 \times 10^4$  から  $Re = \text{約} 3.0 \times 10^4$  までであり、第2領域に入るのも第3領域に移るのも越流型の方が早く、レンジの幅自体は自由落下型の方が大きくなる。これは、同一の条件では、自由落下型の方が自由表面が安定に保たれやすいことを意味し、支持形式に基づく復元力に起因するものと考えられる。

c) 第3領域：全面が乱れる領域

全面に乱れが発生するが、自由落下型では、越流頂裏面よりの空気混入により白濁し、側面方向にも広がるのに対し、越流型では自由表面上に乱れが発生する。これは、自由水脈の支持形式の違いによるものと考えられる。

(4) 水理学的メカニズムの考察

以上より、落水表情の連続的变化についての水理的メカニズムを次のようにまとめることができる。(図-14、図-15)

a) 放出部での層流域、遷移域、乱流域の発生

最初に考えられるのは層流と乱流の区分である。層流においてはその粘性効果により擾乱は減衰されて整然とした層状の流れとなる。これに対して乱流においては擾乱が増幅し表面がより乱れた状態になる。開水路における両者の区分はレイノルズ数で約500~1000の間と言われている。よって、我々が扱うものはほとんど乱流状態であるといえる。落水表情において問題となるのは乱流境界層が自由表面に達することによって同一落水表情上に層流域、遷

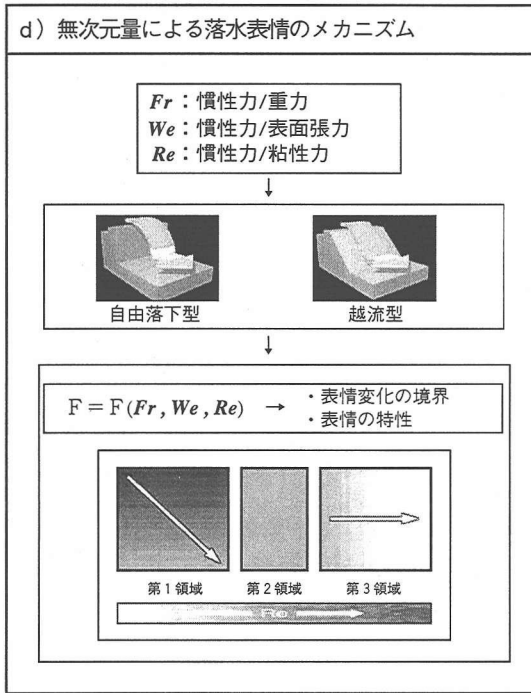


図-15 落水表情のメカニズム-2

移域, 乱流域の3つが同時に出現する場合である。

b) 乱流域における流量変化 ( $Re$ 変化) に伴う表情変化

自由表面の安定問題となる第1領域, 全体が乱れる第3領域, そして, その間の遷移領域である第2領域の3領域に区分される。乱流の組織構造がレイノルズ数の連続的变化に伴い断続的に変化し, それが具体的に視認可能な形態として現れてきている。これは, 複雑系のカオスにおける相転移に該当する現象と考えられ, Navier-Stokesの方程式の強い非線形性に起因するものと考えられる。

c) 第1領域における自由表面の安定問題

レイノルズ数が小さい場合, すなわち, 乱流による乱れが少ない場合の自由表面の成長プロセスについては次のように考えられる。水脈の自由表面に外力が加わるとその自由表面は復元しようとする。その復元力としては重力によるものと表面張力によるものの2種類が考えられる。両者の違いは水脈が固定床によって支持されているか(supported) 支持されていないか(unsupported) による。よって, 微小擾乱が加えられた時にこの復元力により自由表面を安定に保てるか否かにより表面の形状が決定されるものと考えることができる。ここで考えている微小擾乱は自然界に不可避免的に存在する制御できない微

小な擾乱のことである。このように, 落水表情を自由表面の安定問題, すなわち, 微小擾乱の成長問題と考えることにより, 落水表情の発生条件および特性を無次元化された物理量である, フルード数 $Fr$  (慣性力/重力) とウェーバー数 $We$  (慣性力/表面張力) によって表現することが可能となる。すなわち, 支持形式により復元力の要因は異なるが, 全体として微小擾乱に対して復元力がどのように働くかによって自由表面の形状が決定されるという点では初期状態における落水の表情を包括的に説明できるものと考えられる。

d) 無次元量による落水表情のメカニズム

以上より, 自由落下型および越流型の落水表情がレイノルズ数によって3領域に区分され, その第1領域が自由表面の安定問題になると考えられることより, 次の段階として, 本実験結果を基にして, 各表情の特性を定式化し, 水理学の基本的な物理量でまとめ, 無次元量で表現することが可能であると考えられる。前述の式(1)もこの中に組み込まれるものと考えられるが, 本研究の目的は, 落水表情の形態的特徴を現象的に把握し, 落水表情の全体としての連続的变化を説明する理論的な枠組みを明らかにすることを主題としており, 個々の落水表情変化の境界と特性を具体的に式を展開して求めることは, 今後の課題とする。無次元量による基本式は,  $D$ を相似則における無次元化のための基準長さ,  $L$ を任意の長さとする次のようになると考えられる。

自由落下型:

$$L/D = f_1(We, Re) \quad (2)$$

越流型:

$$L/D = f_2(Fr, Re) \quad (3)$$

尚, 本研究が対象としているのが, 平均化された数値としての落水表情よりは, 2次元または3次元の具体的な形態的特徴であることより, デザイン等への応用を前提とした展開方法としては, 前述の基本式の具体的展開の他に, 今回の実験結果そのものをスケールと時間を有する基礎データと位置づけ, 相似則に基づき,  $CG$ で3次元空間上で展開する方法が考えられる<sup>12)</sup>。

4. おわりに

本研究は, 自由落下型と越流型の落水表情について実規模実験を行いその形態的特徴の抽出とその比較および落水表情の全体としての連続的变化を説明するような理論的な枠組みについての考察を行ったものであり, 落水表情の基本的な形態である自由落

下型と越流型のそれぞれについて流量変化に伴う連続的な表情変化を、はじめて水理量を用いて包括的に整理を行ったものである。得られた結果は、以下のようにまとめられる。

自由落下型と越流型の落水表情の形態の連続的な変化は両者とも、自由表面の安定問題となる第1領域、遷移領域である第2領域、全面が乱れる第3領域に区分される。

それぞれの領域の形態および3領域の境界値は自由落下型と越流型とで異なる。

自由表面の安定問題となる第1領域は微小擾乱の成長問題と考えられ、unsupported typeの自由落下型では表面張力が、supported typeの越流型では重力が復元力として働くものと考えられる。

今後の課題としては、自由落下型と越流型の落水表情の基本式である式(2)、式(3)を落水表情の境界と特性について具体的に展開するとともに本実験結果をより汎用的な形で利用するための方法論を明確にすることである。また、本研究が落水表情のデザイン手法を開発することを目標としていることより、落水表情の観点からの流れの評価や表情の情緒的側面の研究も将来の課題となってくるものと考えられる。

謝辞：本論文における実規模実験を実施するにあたっては、日本工営株式会社中央研究所水理研究室の皆様方の様々の御助力をいただいたことをここに記し感謝するものであります。

#### 参考文献

- 1) York, J.L., Stubbs, H.E. and Tek, M.R. : The Mechanism of Distintegration of Liquid Sheets, *Trans. of ASME*, pp.1279-1286, 1953.
- 2) Hagerty, W.W. and Shea, J.F. : A Study of Stability of

Plane Fluids Sheets, *Journal of Applied Mechanics*, pp.509-513, 1955.

- 3) Chen, T.F. and Davis, J.R. : Distintegration of a Turbulent Water Jet, *Proc. of ASCE*, pp.175-206, 1964.
- 4) 坂本龍雄, 是枝 忍, 丸岡 計 : アーチダムの越流に関する一現場観測, 電力中央研究所技術研究所報, 第10巻, 第56号別刷, pp.1-4, 1960.
- 5) 坂本龍雄 : アーチダムから自由落下する2次元ナップの縦断形状について, 電力中央研究所技術研究所報, 第13巻, 第3号別刷, pp.33-39, 1963.
- 6) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 岩佐義朗 : 急斜面上の層流における転波列の理論-薄層流に関する研究(第5報) -, 土木学会論文集, 第19号, pp.46-57, 1954.
- 7) 岩垣雄一, 岩佐義朗 : 転波列の水理学的特性について-薄層流に関する研究(第7報) -, 土木学会誌, 第40巻, 第1号, pp.5-12, 1955.
- 8) Chanson, H. : *Air Bubble Entrainment In Free-Surface Turbulent Shear Flows*, Academic Press, pp.153-164, 1996.
- 9) 一丸義和, 篠原 修 : 落水表情に着目した河川横断構造物のデザイン方法論-越流型固定堰の表情予測 -, 土木計画学研究・講演集, 第16巻, 第1号, pp.373-380, 1993.
- 10) 星野裕司, 篠原 修 : 自由落下型落水形態の水理学的予測手法, 土木計画学研究・論文集, 第12巻, pp.279-282, 1995.
- 11) 逢澤正行, 篠原 修 : 水理学的知見に基づく落水表情の予測とデザイン, 水工学論文集, 第41巻, pp.1121-1124, 1997.
- 12) 逢澤正行, 篠原 修 : 水理学的知見に基づく落水表情と流水表情の予測手法, 土木学会論文集第4部門投稿中.
- 13) 棚津家久 : 水理学・流体力学, 朝倉書店, pp.84-125, 1995.
- 14) 逢澤正行 : 落水表情の予測手法とデザインに関する研究, 東京大学学位論文, pp.44-81, 1996.

(1997. 6. 16 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TEXTURE OF FALLING WATER OF FREE FALLING AND SLOPE FALLING TYPES

Masayuki AIZAWA and Osamu SHINOHARA

A full scale experiment was carried out to investigate the texture characteristics of the falling water of free falling and slope falling types. According to the increase of Reynolds number, the texture of falling water was classified into three categories for both types: stability of free surface, transition and whole turbulence. In the first category the stability of the free surface was related to the growth of minute disturbance. Surface tension works as a counter force to the disturbance in free falling water, and gravity in slope falling water.