

水理学的知見に基づく落水表情の予測とデザイン

Estimation & Design of Texture of Falling Water from a Hydraulics Point of View

逢澤 正行* 篠原 修**

By Masayuki AIZAWA and Osamu SHINOHARA

At present, lacking hydraulics study, the design of texture of falling water depends on the experience of each designer or a test study for each case. For the first step to construct a systematized engineering design method, a full scale experiment was carried out and the texture of falling water was classified into three categories for both free falling and slope falling water. According to the limit of the law of similitude, computer graphics (CG) were introduced for the design method instead of a reduced scale model. Further study of hydraulic mechanisms and of design methodology are proposed for the next step in the design of texture of falling water.

Keywords : Texture of Falling Water, Design Methodology, Hydraulics Mechanisms

1. はじめに

1.1 研究の背景

落水表情は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。我々は、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^{(1), (2), (3)}、この方法論では適用範囲の点で限界があり、水理学の基本に立ち戻って理論的考察と実験的検証を行うこととした。

1.2 研究の目的

本研究の目的は次の2点である。

* 正会員 工博 日本国土開発株式会社 土木本部, 東京大学研究員 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
(〒107 東京都港区赤坂4-9-9)

** 正会員 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 東京都文京区本郷7-3-1)

- ①落水表情の水理学的特性：落水表情とは水理学的にどのような現象であるのかを明らかにする。
- ②落水表情のデザイン方法論：落水表情の水理学的特性を基に落水表情を予測する手法を開発し、その予測手法を基にデザインに展開する為の方法論を明らかにする。

1.3 研究の方法

落水表情のデザインを可能とすることを目標に、落水表情の水理学的特性の解明において、理論面からの演繹法的アプローチおよび実規模実験による帰納法的アプローチを行う。落水表情のデザイン方法論においては予測手法の確立および視覚化方法論の確立を行う。

1.4 研究の対象

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。ここで、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。両者の違いは水束型においては流軸直行方向の波が円周方向に繋がっているため水膜型よりも不安定になりやすい点にある。同様に、越流型についても、通常の越流型と緩勾配型が考えられるが、両者の違いは越流型が流れの発達過程であるのに対して緩勾配型が流れの均衡状態に達した最終状態を扱うものである点にある。最後に、自由落下型と越流型の中間形態のものが考えられるが、これ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に自由落下型に近い形態で落水しているものである。具体的な例としてはダム の放流時におけるホワイトウォーターなどがこれに該当する。

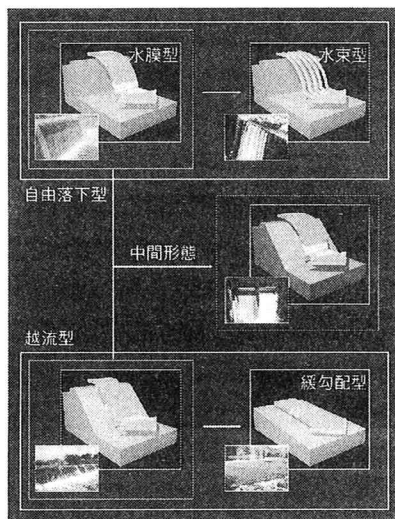


図-1 研究の対象

2. 落水表情の水理学的メカニズム

落水表情の水理学的メカニズムについては、Navier-Stokesの方程式の強い非線形性により、直接解くことは困難である。そこで、落水表情を構成する基本的な物理量を基に考察した後、実験的に検証するものとする。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が、レイノルズ数による層流と乱流の区分を除けば、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）にある。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られる。このように落水表情を自由表面の不安定問題、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）とウェーバー数（We）によって表現することが可能となる。これに加え、流量増加に伴うレイノルズ数（Re）の増加により、上述の自由表面の不安定問題としてよりも流れの乱れの問題として扱うことが必要になると考えられ、無次元化した自由落下型と越流型の基本式は次式のようになる。

$$\text{自由落下型} : L/D = f_1(We, Re) \quad (1)$$

$$\text{越流型} : L/D = f_2(Fr, Re) \quad (2)$$

ここで、Dは相似則における無次元化のための基準長さ、Lは任意の長さ

ここで、水理学関連の既往の研究として、自由落下型に関連する研究としては、York等 (1953)⁴⁾、Hagerty等 (1955)⁵⁾、Chen等 (1964)⁶⁾ が放出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。また、越流型に関連する研究として岩佐等 (1954, 1955)^{7, 8)} 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。また、自由落下型と越流型を包括的に扱うものとしては初めての研究である。

3. 落水表情の実規模実験

落水表情の水理学的メカニズムの検証及び境界値の特定、落水表情のデザインの為のAVデータの収集を目的として、図-2に示すように落下高さ5mの実規模模型を作製し（自由落下型1種類及び越流型2種類）、単位幅流量 $0.003 \sim 0.500 \text{ m}^3/\text{s}$ で落水させることにより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。図-3は自由落下型の第1領域を側方から撮影したものであるが、落水表情が膜とばらけに明確に区分され、流量増加に伴う境界位置の下降が観測された。これは、安定して落下していた水脈が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。また、図-4に示すように同一の構造形式において流量の増加（ Re の増加）に伴い落水表情が3領域に段階的に変化していくと同時に、自由落下型（unsupported）と越流型（supported）とで個々の具体的な表情は異なるが、レイノルズ数が比較的小さい時には自由表面の安定問題となり、レイノルズ数の増加に伴って全体の様相が不連続そして段階的に変化するという点では共通の形態的性質を有することが検証された。尚、実規模実験の結果については別途報告する予定である。

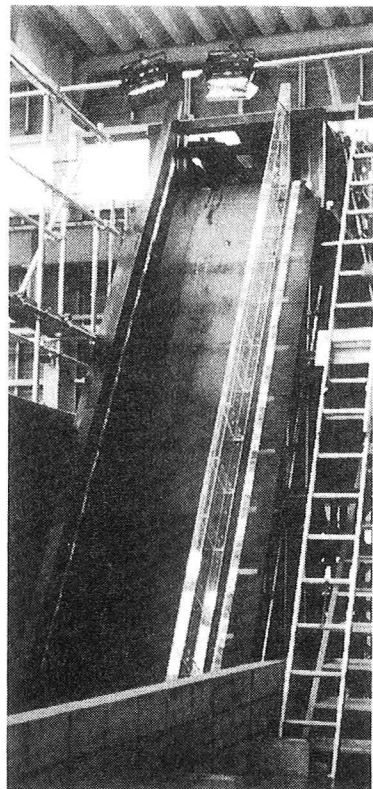


図-2 実験模型（越流型 60° ）

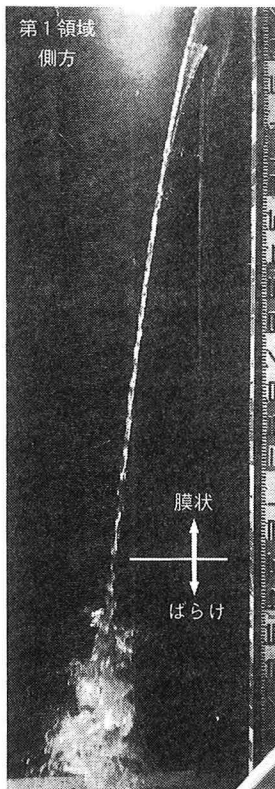


図-3 自由落下型落水表情

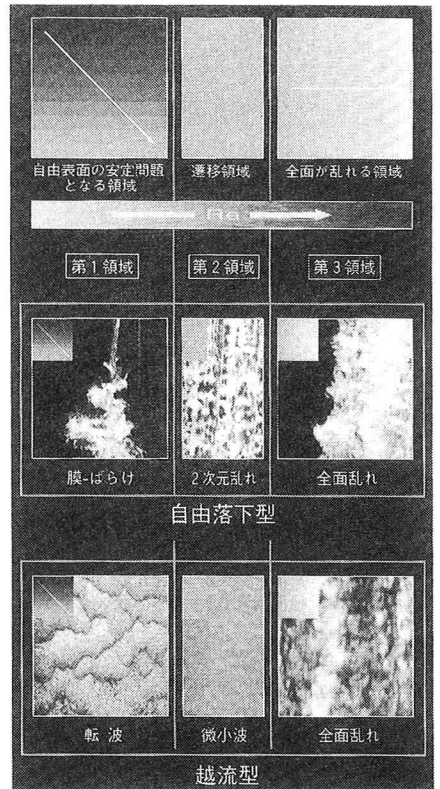


図-4 落水表情の連続的变化

4. 落水表情のデザイン方法論

構造物のデザインにおいては、一般に縮小模型が用いられるが、落水表情については相似則との関係で縮小模型によって落水表情と構造物のデザインを行うことはできず、それに換わる方法論としてコンピュータグラフィックス（CG）の運用が必要となる。図-5にCGによるデザインの事例として津和野川落差工の視覚化の例を示す。落水表情のデザイン方法論についても別途詳細な報告を行う予定であるが、以下にデザイン時の要点を示す。

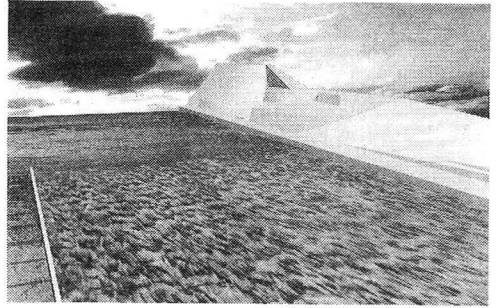


図-5 CGによる視覚化の事例

- (a) 落水表情における表情の領域区分が Fr , We , Re といった無次元化されたパラメータによって表されることより、これらの結果をデザインに用いる方法の一つとして必要な範囲で相似則を仮定した上で無次元量を流量といった有次元なパラメータに置き換えて落水表情を予測する方法がある。
- (b) 実験で実際に計測した写真とVTRがそれ自体スケールや時間軸を有する無次元量の相似則の中で展開可能なビジュアルデータであることより、これらのデータをCGの三次元空間上で展開し、事前に視覚化することにより、落水表情の予測を構造物のデザインにフィードバックさせることが可能となる。
- (c) 構造物との関係においては、三次元空間上でパラメータを共有することにより複数の側面（機能面、構造面、景観面）の同時決定がデザイン方法論的に可能となる。

5. おわりに

以上により、落水表情のデザインという景観の分野に属する問題が水理学的知見を用いることにより初めて実現可能となることを示した。これは、工学的意味におけるデザインが構造、水理、歴史といった他分野との協調によって成り立っていることを物語っている。

尚、落水表情の水理学的特性と落水表情のデザイン方法論については既述したように別途詳細な報告をする予定であり、また、表面粗度の影響やDNS（Direct Numerical Simulation）による数値水理的なアプローチについては現在、研究を進めているところである。

参考文献

- 1) 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, 1993
- 2) 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・講演集, 第12巻, 1995
- 3) 池田大樹, 篠原 修, 逢澤正行: 粗度が大きい緩勾配水路における流水表情—半球を用いた水理実験—, 土木計画学研究・講演集, 第18巻, 1995
- 4) York, J.L., Stubbs, H.E., Tek, M.R.: The Mechanism of Distintegration of Liquid Sheets, Trans. of ASME, 1953
- 5) Hagerty, W.W., Shea, J.F.: A Study of the Stability of Plane Fluid Sheets, J.M., 1955
- 6) Chen, T.F., Davis, J.R.: Distintegration of a Turbulent Water Jet, Proc. of ASCE, 1964
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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, 1996