

人工粗度の流水表情に及ぼす影響

Effects of Artificial Roughness on the Shape and Texture of Flowing Water

逢澤正行* 篠原 修**

By Masayuki AIZAWA* Osamu SHINOHARA**

1. はじめに

流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、形態的観点から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、流水表情のデザインにおいてはデザイナー個人の経験によって仕様を決めているのが現状である。これは、流水表情が理論的には水理学に支配されるものであり、水理学的知見に基づく予測手法を確立しない限りその固有の特徴を把握することもできず、さらには、理論的根拠を有するデザイン方法論を確立することも不可能であることによる。

ここで、流水表情の主要な規定要因である粗度要素を水理学的観点から扱っているものとして、粗面乱流の抵抗特性に関連した様々な研究がある。Nikuradse¹⁾は粗度要素を等価な相当砂粒粗度に置き換え、Schlichting¹⁾はこの考え方を実験的に拡張し、足立²⁾は線状粗度要素である棧粗度と点状粗度要素であるイボ粗度についての実験式を示し、小川ら³⁾は護岸法覆工のイボ粗度についてまとめている。しかし、これらは粗面乱流の抵抗特性、すなわち、「力」の側面に注目したものであり、それ自体が直接的に流水表情の「形」を扱うものではない。

また、流水表情を形態的観点から研究したものとしては、中村ら⁴⁾が釣り師の経験則を基に流相を「チャラ瀬」や「ザラ瀬」等に分類しているが、これは流水における機能（釣り場）と形態（流相）との関連についてのものであり、景観的観点から粗度

要素と流水形態との「力」と「形」の関係をまとめたものではない。

著者ら⁵⁾は、単一および少数（3行3列の格子状）の半球型粗度についてモデル実験を実施することにより、流水表情を予測する手法を提案したが、この方法論では適用範囲の点で限界があった。

本論文においては、流水表情予測のための基礎データを収集する目的で、形態的観点から流水表情の水理学的メカニズムを考察した後、実規模実験による検証、および、流水表情整理のための枠組みについて考察する。

尚、本論文においては「表情」という用語を水理学的メカニズムに基づく流水の発現形態に限定して用いている。その人間心理に与える情緒的側面の分析は今後の課題とする。

2. 流水表情の水理学的メカニズム

半球型と直方体型の人工粗度を対象に、種々の粗度要素配置様式（形状、大きさ、中心間距離、配置、勾配等）の流水表情に及ぼす影響をその水理学メカニズムから考察する際には次のような論点がある。

（1）単一粗度についての考察：跳水現象

射流から常流への局所急変流においては、大規模渦が発生し跳水現象が起きるが、単一粗度においては、粗度前面と粗度後面での跳水発生の可能性がある。ここで、単一粗度の抵抗特性を考えれば、半球型よりも直方体型の方が粗度前面での抗力係数が大きいから、直方体型では粗度前面でのより大きな跳水現象の発生が考えられる。

また、前述のモデル実験の結果⁵⁾より、流量増加に伴う飛散の発生が考えられるが、この場合にも、

キーワード：景観、空間設計

*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, TEL03-5410-5807, FAX03-5410-5808)

東京大学研究員 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

**7人 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, TEL03-3812-2111, FAX03-5689-7269)

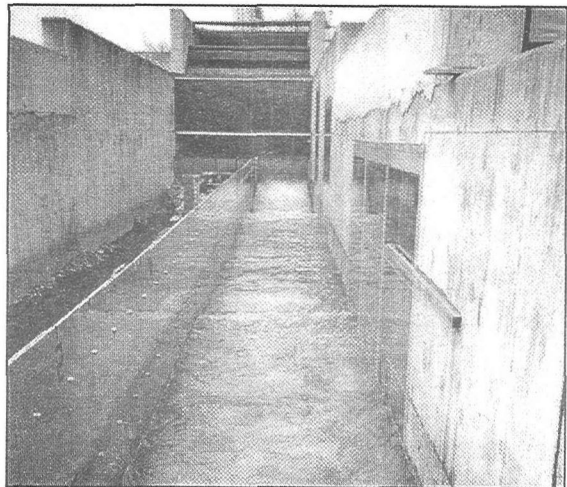


図-1 実験水路

(建設省土木研究所 環境部河川環境室 河川環境実験水路)

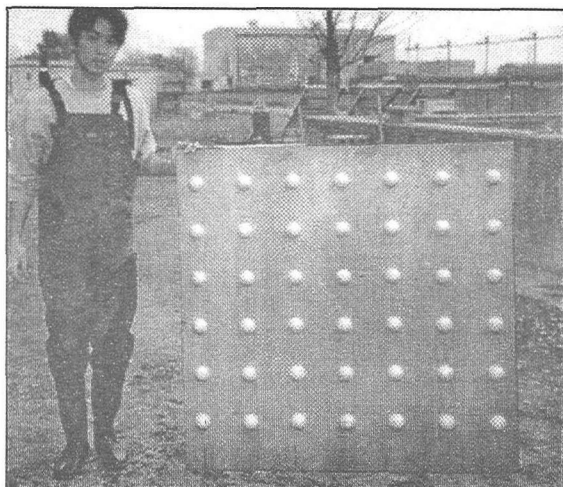


図-2 実験模型

(粗度要素：発砲スチロール，基礎材：合板 1.25m×1.25m)

抵抗係数の大きな直方体型においては粗度前面での飛散の傾向が強いことが考えられる。

(2) 多数粗度についての考察：後流の相互干涉

粗度要素の後流の干涉の度合いによって粗面乱流は次の3種類に区分できる²⁾。

- a) 孤立粗度流
- b) 不完全干涉流
- c) 完全干涉流

多数粗度の流水表情は、個々の粗度要素回りの跳水や後流が明確に識別でき、それら構成要素の幾何学的配列となる「個の集合」と、後流が相互に干涉し合い個々の構成要素に分解不可能な「面状」に大別できるものと考えられる。尚、後流の干涉度合いは、相対粗度密度（粗度要素1つ当たりの河床面積／粗度要素の流れ方向の投影面積）の減少に伴い増加する傾向にあることより、同一サイズの粗度要素では、単位面積当たりの粗度要素数の増加に伴い流水表情は「個の集合」から「面状」にシフトしていくものと考えられる。

また、粗度要素の相当砂粒粗度による仮想原点から粗度天端までの距離に対して、水深が安定した壁面領域が確保されるほど十分深ければ、異なる粗度要素配置様式に対して同様な「面状」の流水表情が発生する可能性がある。

(3) その他の影響要因

半球型の粗度要素で粗度要素周辺の相対水深（水深／粗度高さ）が1に近い場合には、流量バランスとの関係で、粗度要素配置様式によっては、粗度周辺と粗度間隔とで水深に高低差が発生し、水面形にある種の紋様が形成される可能性が考えられ、その結果、上述の「個の集合」と「面状」の分類とは異なる表情領域が発生する可能性がある。

3. 流水表情の実規模実験

流水表情の水理学的メカニズムについての考え方を検証するとともに具体的な流水表情についての基礎データを収集する目的で流水表情の実規模実験を実施した。相似則との関係で縮小模型実験では実現象の把握が困難であるからである。

(1) 実験方法

以下の仕様により、60ケースの粗度要素配置様式の多数粗度（最大約50行50列）について、流量を7～9段階に変化させて約500ケースの流水表情についてのデータを収集した。

(a) 実験水路

幅1.25m、長さ20mの水路（図-1）内に延長2.5mで勾配1/4、1/10の斜路（図-4）を設置した。最大単位幅流量は $0.500\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とした。

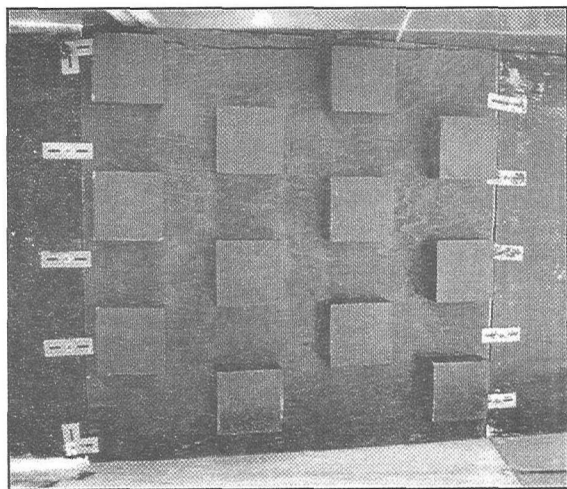


図-3 実験模型設置図
(表面：黒色塗装，上下端を薄板で固定)

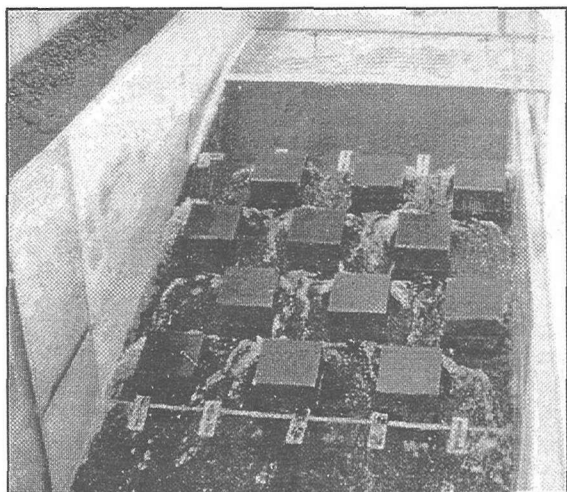


図-4 実験状況

(b) 実験模型

実験模型は図-2 に示すように1.25m×1.25m×1.0cmの合板に発砲スチロール製の粗度を接着し黒色塗装し，鋼製の薄板で前述の斜路に固定した（図-3，図-4）。粗度配置は図-5～図-7 に示すように半球型および直方体型の粗度を千鳥型および格子型に配置した。粗度要素の大きさおよび中心間距離は次の通り。

大きさ d : 2cm, 6cm, 18cm (直径，一辺)

中心間距離: 1.1 d , 2.0 d , 3.0 d

(c) 計測項目

流量変化に伴う流水表情の変化を写真撮影（真上と斜め下流）とVTR撮影（斜め下流）を行った。

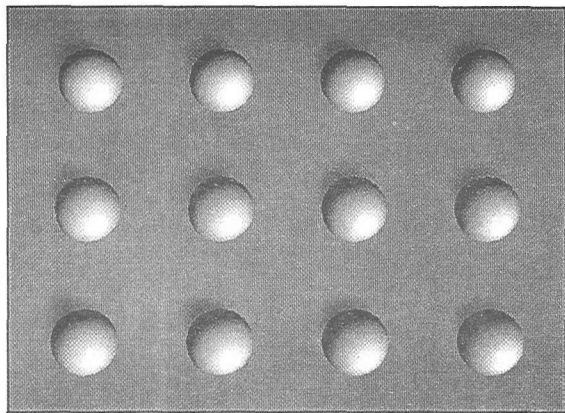


図-5 粗度配置の事例1（半球，格子型）

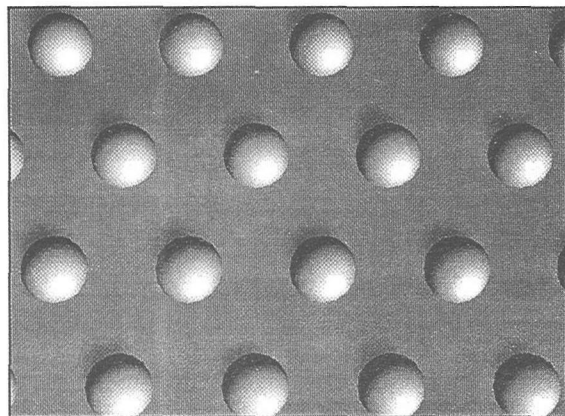


図-6 粗度配置の事例2（半球，千鳥型）

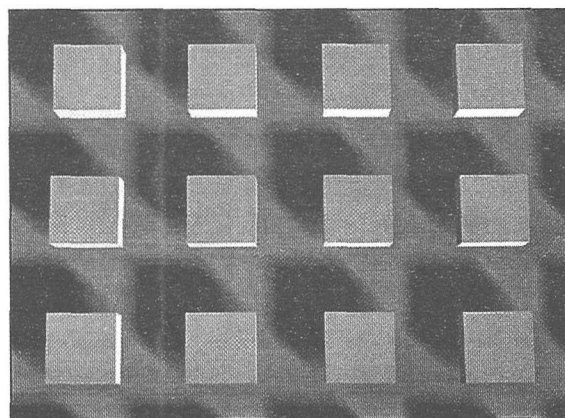


図-7 粗度配置の事例3（直方体，格子型）

(d) 実験場所および実験期間

実験場所：

建設省土木研究所 環境部河川環境室 河川環境実験水路

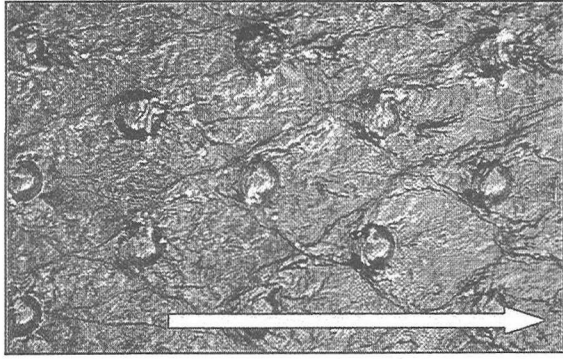


図-8 流水表情の事例（個の集合：葉紋）
（半球，直径6cm，中心間距離18cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 7.1）

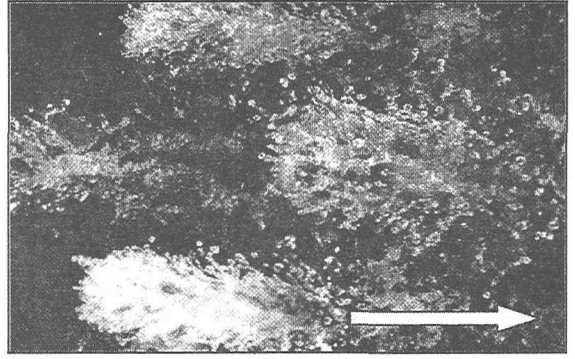


図-10 流水表情の事例（個の集合：飛び白み）
（半球，直径18cm，中心間距離54cm，千鳥配置，勾配1/4，Fr 6.8）

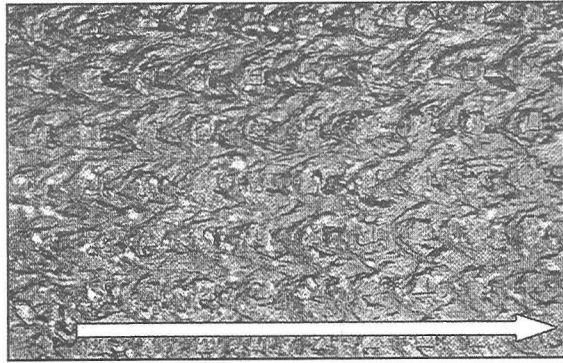


図-9 流水表情の事例（個の集合：柳紋）
（直方体，直径2cm，中心間距離6cm，格子配置，勾配1/10，Fr 7.1）

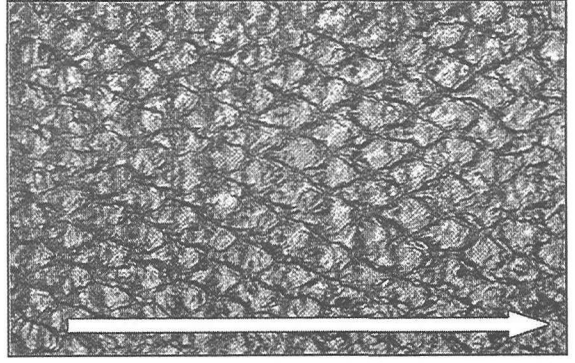


図-11 流水表情の事例（個の集合：鱗）
（半球，直径2cm，中心間距離4cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 12.3）

実験期間：

1996年12月16日～1997年1月31日

（2）結果と考察

実規模実験の結果，流水表情は底面粗度との関係で，前述の「個の集合」と「面状」，そして「線状」に3分され，約10パターンの特徴的な表情に区分されることが判明した．以下に具体的な事例を通して流水表情の水理学的メカニズムとの関係を考察する．

（a）個の集合

個々の構成要素が明確に識別でき，それらの幾何学的配列となる「個の集合」に属するものは，後流の相互干渉との関係では，孤立粗度流または不完全干渉流に属する．図-8の「葉紋」（今回の実規模実験の結果を基に流水表情の命名を行った．以下同）は，半球前面での跳水と後流の緩い相互干渉によって全体として「葉」の形の「紋」を形成している．図-9の「柳紋」も同様である．また，図-10の

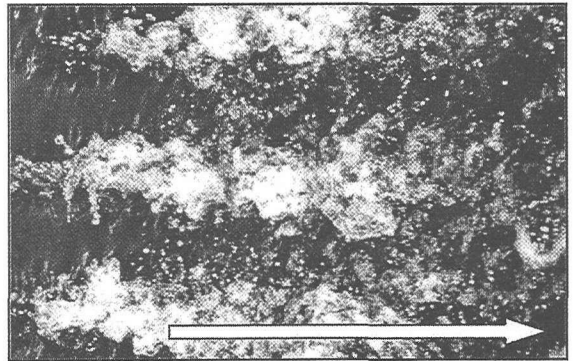


図-12 流水表情の事例（線状：白み縞紋様）
（半球，直径6cm，中心間距離18cm，格子配置，勾配1/10，Fr 4.4）

「飛び白み」は上流側粗度の後流の影響を下流側がほとんど受けず孤立粗度流となり，個々の構成要素が形態的に独立した状態にある．図-11の「鱗」は後流が相互に干渉し合いながら，なおかつ，前章で述べた粗度回りの流量バランスによって特有の水面形状を形成している．ここで，図-8～図-17における矢印は流下方向を示しており，その長さは約

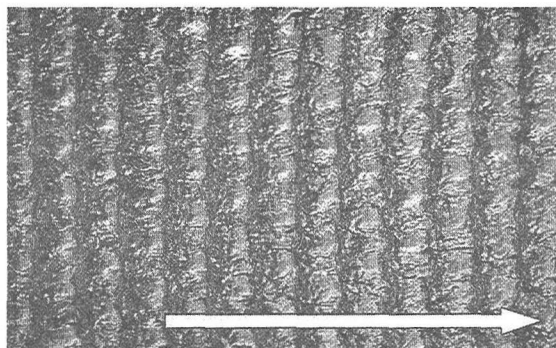


図-1 3 流水表情の事例（線状：段紋様）

（半球，直径6cm，中心間距離6.6cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 5.1）

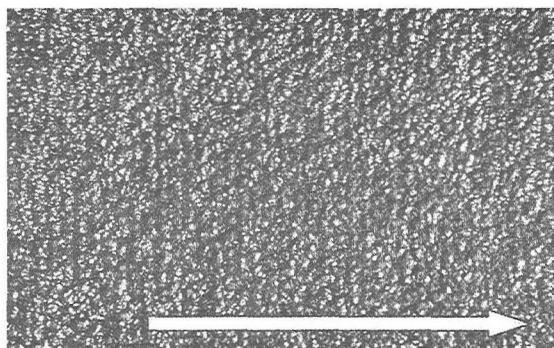


図-1 4 流水表情の事例（面状：笹綾）

（半球，直径2cm，中心間距離2.2cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 9.4）

50 cmに相当し，図中に記したフルード数 Fr は次式によって求めた．

q ：単位幅流量（ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ）

H ：水深（ m ）

U ：流速（ q/H ）（ m/s ）

g ：重力加速度（ m/s^2 ）

Fr ：フルード数（ $U/\sqrt{gH}$ ）

（b）線状

今回の実規模実験の結果，前章で述べた「個の集合」と「面状」の他に形態的には「線状」として分類できる流水表情の一群が存在することが判明したが，その水理学的メカニズムは，流下方向に「縞」状の線状紋様ができるグループと流下直角方向に「段」状の線状紋様ができるグループで明らかに異なる．図-1 2の「白み縞紋様」は前者の例であり，流下方向の直上側粗度の後流の影響のみを受け，側方側の影響を受けないためにこのような「縞」状の線状紋様が形成される．これに対し，図-1 3の「段紋様」は後流の影響を受けながら，前章で述べた粗度回りの流量バランスによって「段」状の線状紋様を形成している．ここで，前述の図-1 1の「鱗」と図-1 3の「段紋様」とでは同じように後流が相互に干渉し合いながら，なおかつ，粗度回りの流量バランスによって特有の水面形状を形成しているにも拘わらず，異なるグループに属するのは，粗度要素配置様式の違いに起因する．

（c）面状

後流が相互に干渉し合い個々の構成要素に分解不可能な「面状」に属するものは，後流の相互干渉との関係では主として完全干渉流に属する．この場合に，典型的なのは，流量増加に伴い，図-1 4の「笹綾」から図-1 5の「ゆらぎ」を経て図-1 6の

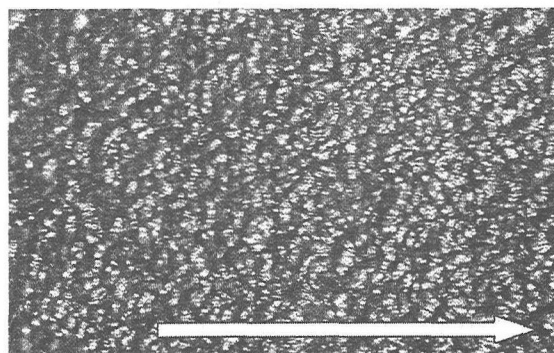


図-1 5 流水表情の事例（面状：ゆらぎ）

（半球，直径2cm，中心間距離2.2cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 8.1）

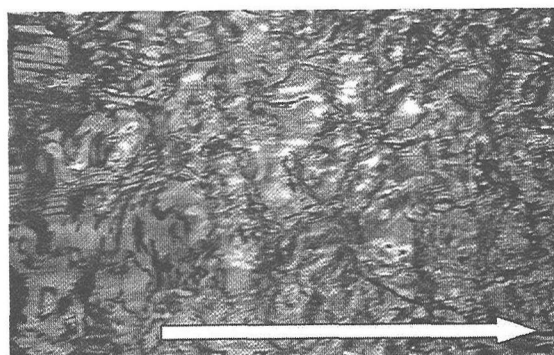


図-1 6 流水表情の事例（面状：うねり）

（半球，直径6cm，中心間距離12cm，千鳥配置，勾配1/10，Fr 3.0）

「うねり」に到る事例であり，前章で述べたように異なる粗度要素配置様式において同様の傾向がみられる．これに対して，図-1 7の「泡立ち」のような事例は粗度要素配置様式の影響が大きいグループといえる．

（d）モデル実験と実規模実験の関係

前述のモデル実験では単一および少数（3行3列の格子状）の半球型粗度（直径3 cm，6 cm）につ

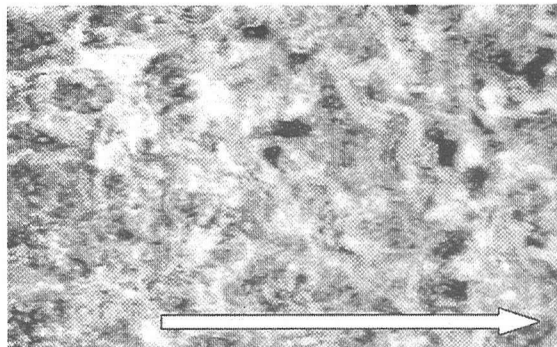


図-17 流水表情の事例（面状：泡立ち）
（半球，直径6cm，中心間距離12cm，千鳥配置，勾配1/4，Fr 8.1）

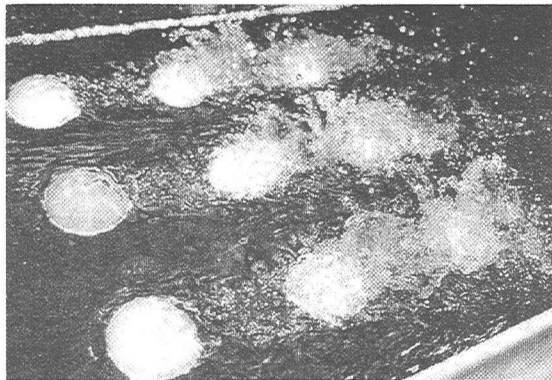


図-18 モデル実験における流水表情
（左から順に滑り型，筋飛び型，砕け飛び型）

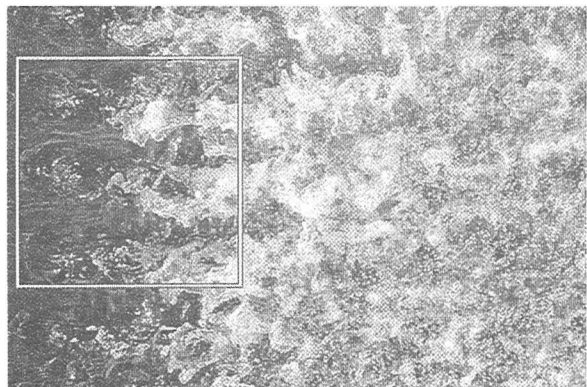


図-19 実規模実験における流水表情
（半球，直径6cm，中心間距離12cm，格子配置，勾配1/10，Fr 4.21）

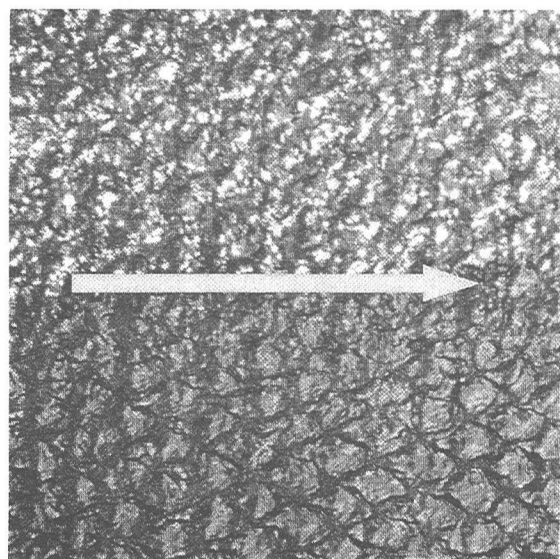
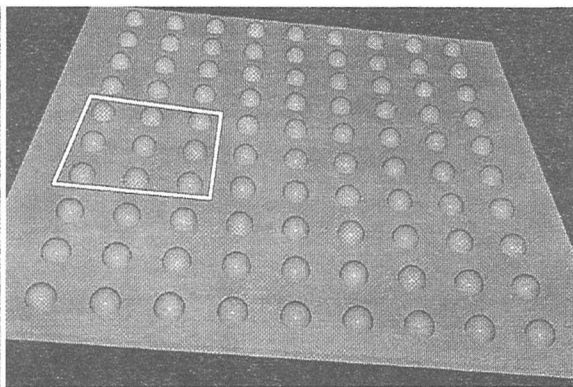


図-20 直射日光の影響
（図-11の「鱗」に対応，上半分が直射日光の部分，下半分が遮った部分）

実施し，図-18に示すような流水表情を得た．この実験条件に対応する今回の実規模実験の流水表情は図-19の四角で囲った部分であり，同図の均衡状態に到る前の発達過程の部分がモデル実験の図-18に該当する．今回の実規模実験はモデル実験の実験条件を大幅に拡張し，側壁および上下流の影響を十分に排除可能になるまで実験規模を拡大したものといえる．また，モデル実験が飛沫等の流水表情発達の初期段階における定性的性質を限られた条件の範囲内で求めたものであるのに対して，実規模実験はより一般的な均衡状態を工学的に扱ったものといえる．

（e）光の影響

図-20に真上からの直射日光を半分遮って撮影した事例を示す．この事例では水面の表面形状よりも直射日光による表面の小さなきらめきのほうが優位にたつことがわかる．そして，この傾向は視線入射角に関係なく多くの事例で成立することが確認さ

いて水路幅60cm，最大単位幅流量 $0.024\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で

れた。

尚、本論文における実規模実験結果を基礎データとするデザイン方法論をCG (Computer Graphics) を用いて、レンダリングレベルにおいてキャリブレーションを行った後アルファチャネルを用いてテクスチャマッピングを行う予測手法を提案している⁶⁾。

4. おわりに

流水には粗度要素との関係で、分類そして再現可能な様々の表情があり、それらは、個の集合、線状、面状の3種類に区分可能であることが流水表情の水理学的メカニズムの考察と実規模実験の実施によって判明した。流水表情を規定する水理学的な主要因としては、跳水現象、後流の相互干渉の度合い、粗度回りの流量バランス等が考えられる。

今後の課題としては、本論文において3種類に区分した各領域に含まれる様々な流水表情の形態的特徴と水理学的メカニズムの関係を数値水理学による解法をも含めて個別にそして体系的に解明することにある。また、流水表情の計測に伴い流水表情に対応する約500ケース分の流水音を記録していることより、それらを音響工学的に解析し、流水音の音

響特性を求めることが可能であると考えられる。

謝辞：本論文における流水表情の実規模実験は、東京大学景観研究室の小林史幸（現大成建設勤務）の卒業研究の一環として研究室の学生諸君の協力の下に行ったものであり、実規模実験を実施するにあたっては、島谷室長ほか建設省土木技術研究所環境部河川環境室の皆様方の様々の御助力を戴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) Schlichting, H: Boundary Layer Theory, 6th ed., McGraw-Hill, pp.623~624, 1968.
- 2) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集，第104号，pp.33~44，1964.
- 3) 小川芳昭，竹本成行，村端克己：護岸法覆工の粗度について，第25回土木学会年次学術講演会，pp.293~294，1970.
- 4) 中村良夫，笹谷康之：語彙体系による河川地形環境認識の把握について，環境システム研究，vol.18，pp.7~12，1990.
- 5) 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・論文集，第18巻，pp.503~509，1995.
- 6) 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，No.590/IV-39，pp.51-62，1998.

人工粗度の流水表情に及ぼす影響

逢澤 正行・篠原 修

流水表情のデザインについては工学的に体系化した方法論は存在せず、デザイナー個人の経験によって仕様を決めているのが現状である。本論文においては、流水表情予測のための基礎データを収集する目的で、形態的観点から人工粗度による流水表情の水理学的メカニズムを考察した後、実規模実験による検証、および、流水表情の整理の枠組みについて考察を行った。その結果、流水には粗度要素との関係で、再現可能な様々の表情があり、それらは、個の集合、線状、面状の3種類に分類可能であることが判明した。流水表情を規定する水理学的な主要因としては、跳水現象、後流の相互干渉の度合い、粗度回りの流量バランス等が考えられる。

EFFECTS OF ARTIFICIAL ROUGHNESS ON THE SHAPE AND TEXTURE OF FLOWING WATER

Masayuki AIZAWA and Osamu SHINOHARA

A full scale experiment was carried out to investigate the effect of artificial roughness on the shape & texture of flowing water. According to the patterns of artificial roughness and Froude number, the shape & texture of flowing water was classified into three categories: repetition of a piece, linear divided pattern, and undivided complex pattern. The principal hydraulics factors which determine the shape & texture are hydraulic jump, the mutual interference of wakes, and the volume balance of flowing water.