

II-20

弱い跳水に於ける流れの3次元構造

北海道大学工学部 正員 浜中建一郎

北海道大学工学部 正員 森 明巨

1. まえがき

跳水現象は水理学に於て最も古くから研究されてきた現象の一つである¹⁾。しかしながらこれまではフルード数によって流れの構造を5つに分類し主として2次元の流れとして研究されてきており²⁾、その3次元構造に言及しているのは著者の知る限りわずかに今井、中川³⁾による研究だけのようなのである。しかし彼らの研究に於いてもわずかに2例の実験が述べられているだけで、跳水流れの3次元構造の大局的理解には至っていない。このことからこの研究では、特に弱い跳水に注目して、その流れの3次元構造を簡単な可視化により把握しようとするものである。

これによって、跳水と側壁境界層との相互作用により新たな境界層が発達し強い3次元流れになることが確かめられた。このことは、空気流における、衝撃波と境界層との相互作用⁴⁾⁵⁾と類似の力学的構造を持つことを示唆している。実際、波状跳水の水面の一般形は空気流の疑似衝撃波⁶⁾と類似の形を持つことが確かめられた。又、洪水時の実河川に於いて見られる三角波状流れと類似の流れが弱い波状跳水によって再現されることも確かめられた。

2. 実験装置及び実験概要

用いた水路は、幅30m、長さ10mの可変勾配水路で、両側面ガラス張りで、底面は滑面を有する。実験に用いた水路勾配 i は、0.0171, 0.0132, 0.0093, 0.0074, 0.0054の5種類で、上流側水深は約0.5cm~4.0cm、流速は約35cm/sec ~ 120cm/sec、フルード数($Fr=U_1/\sqrt{gh_1}$, U_1 : 上流側流速, h_1 : 上流側水深)は約1.2~2.5である。下流端に適当な堰を設置して堰上げを生じさせ、跳水の前面がほぼ水路中央部に位置する様堰高を調整した。上流側は等流となる様充分な流路長となっている。上流側の流速は流量と水深から求めた断面平均流速を用いた。流況、特にはく離の様子は、注射器により染料をゆっくり注入し可視化することによって調べた。

3. 水面波形

前節で述べた水理量で生じた跳水では、いずれの場合も、跳水前面に明確な碎波は生じていない。その意味で、ここでは弱い跳水と呼ぶ。又、いずれの場合も、跳水から下流に向かって波状流れが生じている。便宜上ここでは、第一波目の前面を跳水のフロントと呼ぶ。フロントの一般的形状は水路幅中央部に位置する流下方向と垂直な直線部分と、その両端から上流側壁に向かう斜めくさび形部分とに分けられる。図-1は水面形の模式図であり、(a)図のハッチ

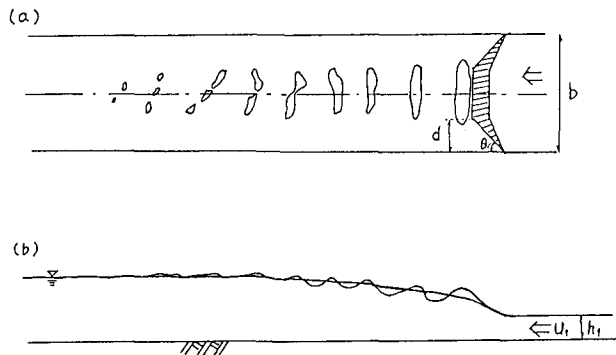


図-1 弱い跳水の水面形の模式図 (a):平面形、(b):断面形

Three dimensional flow structure of weak hydraulic jump

by Ken-ichiro HAMANAKA and Akio MORI

部分がフロントを示す。水位はこのフロント内で急激に高められた後、下流に向いさらに緩やかに上昇しつつ背水曲線に近づく。水路幅中央部のフロント背後では、この水位を平均水位としつつ波状を呈するが、両側壁近傍は波状を呈さない。この中央部の波状水面形は、フロントから下流に向かって徐々に振幅を減ずる定在波であるが、場所によってその様子を異にする。すなわち、フロントの近くでは比較的安定した波形を保つが、下流部になるに従い波峰は不安定となりゆらぎ始め、さらに下流部では分裂・合体をするようになり、ついにランダムな水面となりつつ減衰して平水面となる。もし同じ水量でも堰上げ高が十分高くなく、フロントから堰までの距離が十分でないときは、上に述べた水面波形は、そのまま下流側に平行移動した様に作られ、上に述べた水面波形の途中で堰を越流して終わる。この波状跳水の波形は、大局的にはそれを生じさせた堰の形には依存しない。すなわち、越流堰であっても橋脚で

あっても水流を適当に阻害すれば、そのごく近傍を除き同じ水面形が再現する。写真-1 は非常に弱い跳水のため上に述べた一連の水面波形の全てがフロントのごく近くで再現されている例である。

写真-2は、典型的な八の字形を形成したフロントの一例である。同じ幅の水路で跳水の規模が大きくなると、両側のくさび形フロントは水路中央部に向かって発達し、ついには、中央の流下方向に垂直なフロントの部分は消滅する。このときの横断波形はきれいな三角形状をなし、流下方向には、先に述べた一般的性質を有しつつ一連の三角波が生ずる。この現象は実河川の洪水時に見られる三角波を再現したものか、あるいは少なくともそれを生じさせた要因の一つと考えられる。

この様な三角波形跳水の生じた後、さ

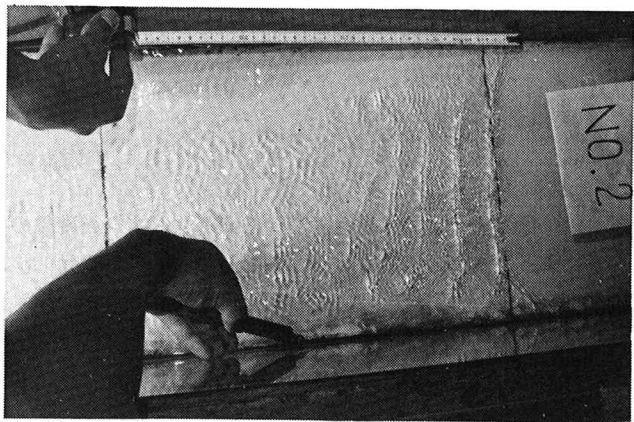


写真-1 弱い跳水の水面形

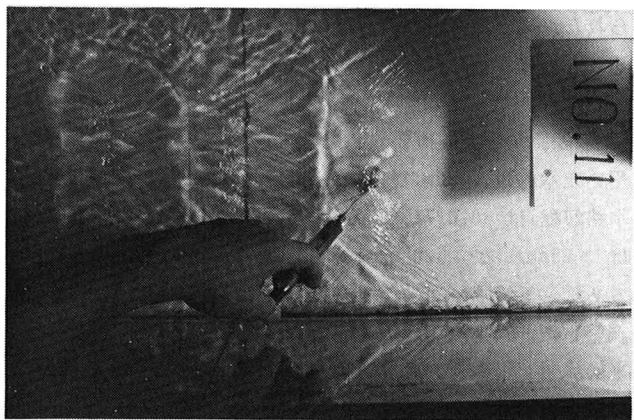


写真-2 くさび形フロント

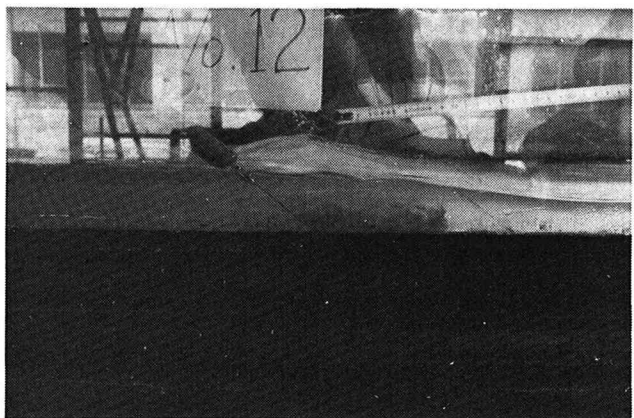


写真-3 側壁に沿う逆流

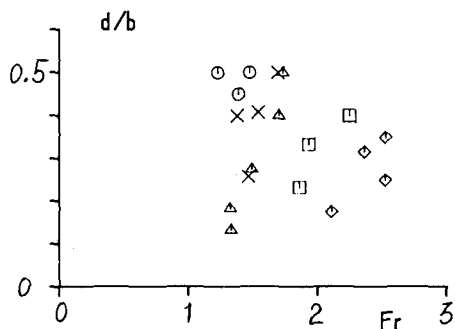
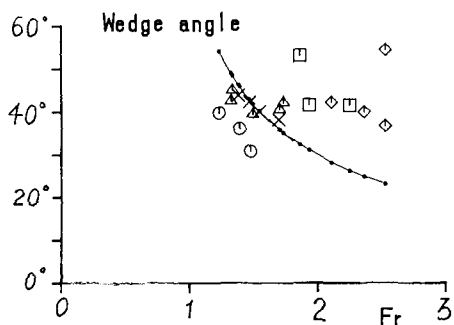


図-2 くさび形フロントの水路幅による無次元幅

図-3 くさび形フロントの側壁との角

◇: $i=0.0171$, □: $i=0.0132$, △: $i=0.0093$, ×: $i=0.0074$, ○: $i=0.0054$

□

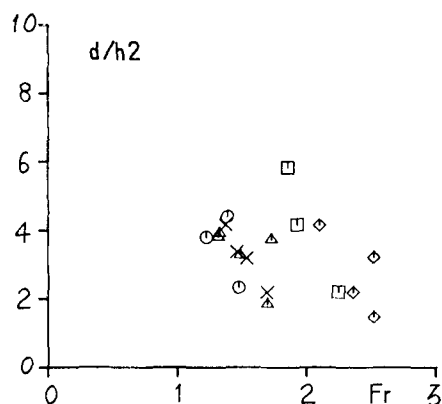
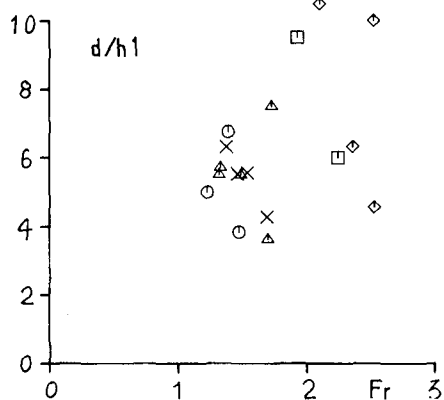


図-4 くさび形境界層の無次元厚さ

□

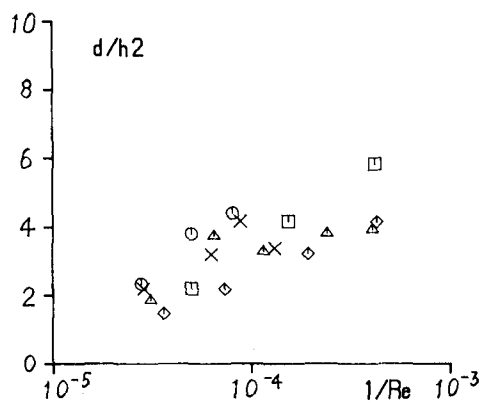
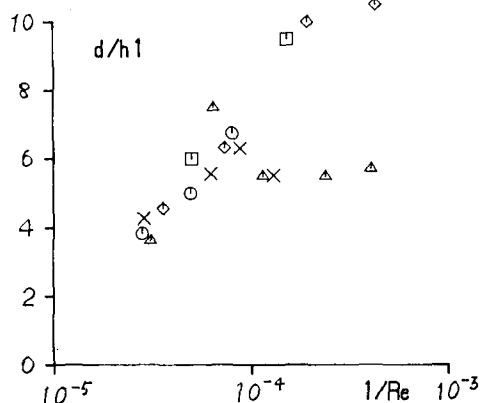


図-5 くさび形境界層の無次元厚さ

らに跳水の規模が大きくなると、両側面から発達したくさび形フロントは水路中央部で重なり合い互いに干渉し合い流下方向に垂直なフロントが新たに形成される。今回の実験では実験装置の制限から出来なかったが、さらに跳水の規模を大きくすると今述べたことから中央部のフロントはさらに発達しついには両側壁に至るであろうことは想像出来る。この時、次節で述べる流れの3次元構造は壊され水路幅方向に統計的に様な流れとなっているであろう。跳水の形態として挙げられている5つのパターンはこの様な状態の流れであろうと思われる。従って、そこに挙げられているフルード数と同じであっても水路幅が適当に広く流れがまだ3次元性を強く持っているとき同じパターンが現れる保証はなく、さらに検討の必要があると思われる。

4. 側壁及び底面近傍の流れ

跳水前面の側壁近傍では、前節で述べたようにくさび形のフロントが出来る。このくさび形フロントの下流側の流れの様子を調べるため、注射器により染料を注入し観察した。それによると、一例を除き、側壁に沿って下流側からフロントに向かう逆流が存在し、フロント近傍で剥離を起こしていることが見られた(写真-1及び3)。この剥離点の位置は水深方向には必ずしも一様ではなく、水面に近い程フロントに近い様である。実際、フロント上流の側壁近くの水面に染料を注入すると、水面に浮かんだ染料の一部は、くさび形フロントに沿って中央部に向かって流下し、水中に沈んだ染料は、水路中央部にゆるやかに曲げられつつ、くさび形フロントを貫通する。

この様に、くさび形フロントの下流の側壁近傍は、明らかに中央部とは異

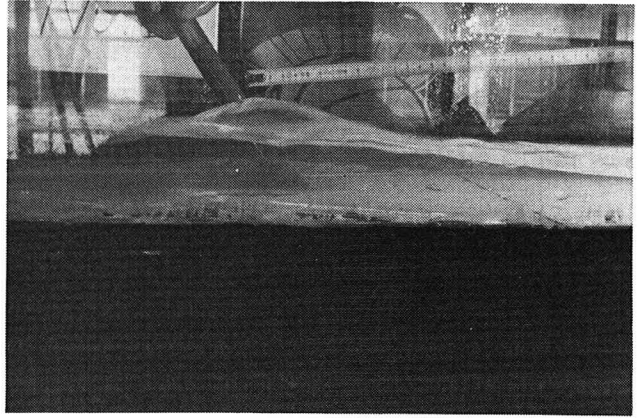


写真-4 底面での剥離のある場合

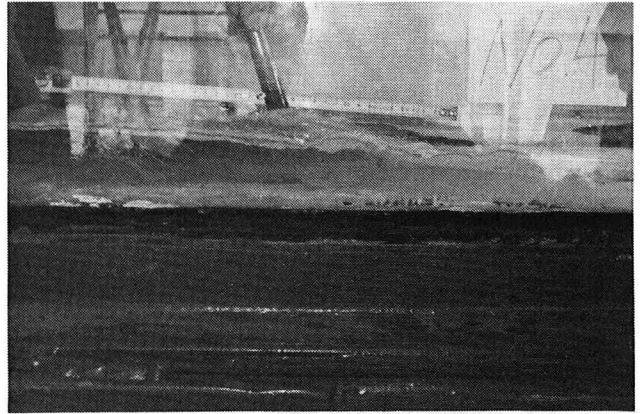


写真-5 底面での剥離のない場合

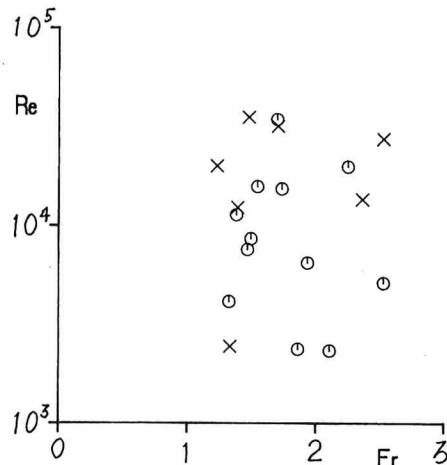


図-6 底面での剥離の発生

なった流れの構造を持つ。ここでは便宜上、それをくさび形境界層と呼ぶ。このくさび形境界層の厚さが側壁からどこまであるかは、細かな流速測定を行わなければ分からないが、ここでは仮に、側壁からくさび形フロントの中央部寄り端点までの距離とする（図-1のd）。図-2はこのくさび形境界層厚dを水路幅bで無次元化した値を上流側フルード数に対して河床勾配 i 毎にプロットしたもので、フルード数の増加に従って増していることが分かる。以後同じ河床勾配に対しては同じ記号を用いる。又、図-3はくさび形フロントと側壁とのなす角を上流側フルード数に対してプロットしたもので、実線はマッハ角を示す。これによると、くさび形フロントのなす角はマッハ角とは明らかに異なりフルード数に依存せずほぼ一定値約40度となっている。しかしながら現在のところ跳水流れの3次元構造の力学機構が明らかにされていないため、何故その様な一定値をとるかは分からない。図-4は、くさび形境界層厚dを上流側水深 h_1 、及び、もし単純跳水が起きていたならとるであろう下流側水深 h_2 で無次元化した値を、上流側のフルード数 Fr に対して、図-5はレイノルズ Re に対してプロットしたものである。いずれの場合も、この無次元厚さは1を越えている。今、仮に跳水が起きていないとすると、流速に及ぼす側壁の影響範囲は水深程度と考えられるから、この無次元厚さが1以上であることは跳水の存在によるものである。又、今、仮に粘性がないとしたなら、側壁の影響は受けないから、くさび形フロント（及び境界層）は存在しない。このことから、このくさび形フロント（及び境界層）は、跳水と側壁の境界層との相互干渉によるものと言える。このことは、空気流に於ける衝撃波と境界層の相互干渉と類似の力学構造を持っていることを示唆する。実際、管内空気流の疑似衝撃波の可視化によると、3節で述べた開水路の波状跳水の水面波形と同様なパターンを持つことが示されている。

フロント中央部の底面近傍の流れも同様に染料の注入によって観察した。それによると、今回の実験条件では半数以上の場合に、フロント直後の山の真下の底面で明瞭な逆流と剥離が観測された。写真-4と写真-5は各々剥離の発生している場合としていない場合の例である。図-6は底面で明瞭な剥離が観測された場合とされなかった場合をフルード数とレイノルズ数で整理したものである。丸印が剥離のある場合、ばつ印がない場合を示す。底面での剥離はレイノルズ数が大きいほどあるいはフルード数が小さいほど起き易い様に見えるが、あまり明確ではなく、今後、より系統的な研究が必要と考えられる。

以上述べたように、弱い跳水の場合その流れは強い3次元構造を持つことが示された。しかしながら前節で述べたように、フルード数が大きくなり跳水の規模が大きくなると、2つのくさび形境界層は重なり合い干渉してその3次元構造を壊し、2次元の流れとなる。今井、中川³⁾ 2つのの実験はその様な2次元流れとなる直前と直後の場合と考えられる。

5. 結語

前節までで述べたことを簡単にまとめると、

- (1) 弱い跳水の、フロントから平水面に至る水面の一般形が記述された。それによると、空気流の疑似衝撃波と類似の形となることが確認された。
- (2) 跳水と側壁境界層との相互干渉により、くさび形フロント及びくさび形境界層が発達することが確認された。
- (3) 剥離を伴ったくさび形境界層の存在や底面での剥離の存在により流れは強い3次元性を持つことが確認された。
- (4) これまでの跳水の5つの分類は、両側壁のくさび形境界層が重なり合い3次元性流れを壊し2次元性流れとなった状態のものであることが推定された。
- (5) 洪水時実河川に見られる三角波状流れに類似の流れが再現された。

以上の様に弱い跳水に於ける流れの3次元構造は大局的には理解されたが、その力学的機構については今後に残された課題である。特に跳水と側壁境界層との相互作用には、空気流に於ける衝撃波と境界層との相互作用と類似の力学機構が見いだされることが期待されるが、乱流に於ける剥離を伴った相互作用に

関しては空気流の場合でもいまだ良く解明されていず、今後多くの研究が期待される。

参 考 文 献

- 1) McCorquodale, J.A. : Hydraulic jumps and internal flow, Encyclopedia of Fluid Mechanics, Vol.2 Chap.6, pp.122-173, 1986
- 2) 水理公式集、土木学会、pp.309、1985
- 3) 今井悟・中川武夫：跳水内部の流れ特性の水路幅方向依存、土木学会第44回年講、第2部、pp.422-423 1989
- 4) Adamson, T.C. Jr and Messiter, A.F. : Analysis of two-dimensional interactions between shock waves and boundary layers, Ann. Rev. Fluid Mech., 12, pp.103-138, 1980
- 5) Inger, G.R. : Application of a shock-turbulent boundary-layer interaction theory in transonic flowfield analysis, Transonic Aerodynamics, Ed by D. Nixon, Vol.81, pp.621-636, 1982
- 6) 写真集流れ、日本機気学会編、pp.28、1984