

## II - 4 0 移動跳水（波状段波非）発生条件の検討

秋田大学 学生員 ○大 橋 伸 之  
秋田大学 正 員 松 富 英 夫

## 1. まえがき

ダムや河川堤防等の破壊による氾濫水、河口部等に入射した津波等が段波を形成するか、波状段波を形成するかを知ることは、波力評価等の関連で、防災工学上重要と思われる。段波が段波であり続ける条件、移動跳水発生条件の統一の見解はまだ確立されておらず、上記の判定等に是非とも必要なものである。

段波は非線形性と散逸性が運動の支配的要因で、波状段波はさらに分散性がその一つに加わった現象である。段波の波状段波への遷移形態に関する研究として、室田・岩田の実験的研究<sup>1)</sup>が代表としてある。彼等はその形態を、1) 非砕波、2) spilling型砕波、3) surging型砕波、4) plunging型砕波の四つに分類した。しかし、plunging型砕波の上限、移動跳水発生条件については言及していない。この理由の一つは、発生段波の波長や伝播距離次第で、流れの形態が微妙に変化し、その判定が難しいためと思われる。著者等の知る限り、その発生条件については、Chester<sup>2)</sup>、Johnson<sup>3)</sup>、著者等の一人<sup>4)</sup>と都司<sup>5)</sup>の理論的研究、Nakagawa et al.<sup>6)</sup>の実験的研究があるくらいである。著者等一人の理論結果の妥当性は、まだ検証されていない。

そこで、本研究は、段波の遷移に関する従来の理論・実験結果の検討と新たな実験により、一次元、水平床で、段波下流側流速が零の場合の一般的な移動跳水発生条件を調べようとするものである。

## 2. 従来の理論と実験結果

著者等の一人は、室田・岩田の段波分散機構<sup>1)</sup>と発生初期の段波先端部は孤立波的性格を有しているという仮定の基に、次の一般的な対象段波の移動跳水発生条件を誘導した<sup>4)</sup>。
$$H_b/h_a > 0.61 \sim 0.64 \cdots (1)$$
ここで、 $H_b$ は段波波高、 $h_a$ は段波下流側の静水深である。式(1)の誘導に際し、BoussinesqとMcCowanの孤立波の砕波限界を用いている。孤立波の砕波限界も、まだ確定されていないからである。これが、移動跳水発生条件に幅がある理由である。室田・岩田の段波分散機構は、実験結果に基づき、孤立波の伝播速度と理想段波の移動速度をほぼ等しいとした点に（両者の運動機構は本質的に異なるが）、新しさがあつた。

Chesterは、波状段波が発生しない条件として、フルード数 $Fr=1.58(1.6)$ を誘導した<sup>2)</sup>。ただし、このフルード数の定義は跳水の場合と同じである。これを書き直すと、
$$H_b/h_a > 0.79(0.82) \cdots (2)$$
彼の理論は、底面境界層でのエネルギー散逸を考慮している。そのため、非粘性解析に比べ、散逸性が大きい。その補償として、段波であり続けるには、非線形性も増大せねばならない。これが、著者等一人のものに比べ、 $H_b/h_a$ が大きい理由の一つと推察される。その他として、流れ条件が異なること等が考えられる。

都司は、粘性パラメータの値を変化させて、KdV-Burgers方程式を数値的に解き、得られた時間波形の傾向から、移動跳水発生条件を $H_b/h_a > 0.60$ とした<sup>5)</sup>。ただし、一次元、水平床で、段波下流側流速が零に対してである。彼の理論は、粘性を考慮している点で、ChesterやJohnsonの理論と基本的に同類である。にもかかわらず、彼等の移動跳水発生条件の間には、大差がある。移動跳水発生条件には、段波下流側流速の有無、底面勾配や底面粗度等の流れ条件（エネルギー散逸条件と換言されよう）が大きく影響するらしい。

従来の諸実験結果について述べる。

室田・岩田は、段波の波状段波への遷移形態の分類において、 $H_b/h_a=0.044\sim0.752$ の実験を行っているが、0.65より大きいものの結果は載せていない<sup>1)</sup>。彼等の論文中の表-1と図-13を参照されたい。この理由の一つは、それ以上だと段波が分散しなかったためと推察される。ただし、彼等の実験では、 $H_b/h_a \approx 0.65$ でも、分散第一波の波高増幅率( $\eta_m/H_b$ )は1より大きい。ここで、 $\eta_m$ は静水面から最高水面までの高さである。これは、初期の段波が十分な段波波長を持たない、孤立性段波であったためと思われる。厳密には、対象段波と異なることに注意を要する。ちなみに、都司は、1.2以内であれば移動跳水と判断している<sup>5)</sup>。

分散第1波の砕波後の波高に着目すれば、興味深いデータが見られる。彼等の論文中の図-11（黒三角）

を参照されたい。 $H_b/h_a=0.62$ の時、砕波後、無次元段波波高をほぼその値に保って伝播している。

Keulegan & Pattersonは Bazinの実験結果(1865)を再整理している<sup>7)</sup>。それによると、 $H_b/h_a>0.61$ の時、“初めの波”の波高増幅率は1以下で、単調減少の傾向にある。彼等の論文中の図-9が本論文の図-1を参照されたい。これは、段波が全体的に減衰しているだけで、遷移していない、すなわち、段波であり続けていることを意味していると解釈される。勿論、 $H_b/h_a<0.61$ の時、波高増幅率は1以上である。

物部水理学では<sup>9)</sup>、ほぼ $H_b/h_a>0.75$ の時、移動跳水になるとしている。ただし、その根拠は明示されていない。推察するに<sup>1), 9)</sup>、Binnie & Orkneyの跳水の実験結果<sup>10)</sup>からかもしれない。

Favreの実験結果によると<sup>8)</sup>、 $H_b/h_a>0.60$ の時、波高増幅率はほぼ1に漸近している(図-1参照)。

ダム破壊(ゲート急開)による段波の遷移実験として、Nakagawa et al.<sup>6)</sup>、土屋・山下等<sup>11)</sup>や著者等一人<sup>4)</sup>のもの等がある。Nakagawa et al.の発生条件は、 $H_b/h_a>0.63$ である。土屋・山下等は $0.4\sim 0.6$ の間にあると指摘している。 $H_b/h_a=0.54$ と $0.61$ の実験では、波状段波であったと言及している。著者等一人の実験では、 $H_b/h_a>0.55$ である。これは他のに比べて小さい。その理由は、段波発生後の短い時間(または、伝播距離)内で判断しているためと思われる。

以上の従来の理論・実験結果を総合すると、対象段波の移動跳水発生条件は $H_b/h_a>0.61\sim 0.64$ 程度と考えられ、著者等一人の近似理論結果はほぼ妥当なものと判断される。

図-1に、波高増幅率と $H_b/h_a$ の関係に関する、既往実験結果を示す。ただし、移動跳水発生条件を横切って、一連の実験値が存在するもののみを示している( $H_b/h_a>0.3$ )。図中には、本章検討で推定された移動跳水発生条件(破線)、McCowanとBoussinesqの孤立波の砕波限界(実線)も示されている。

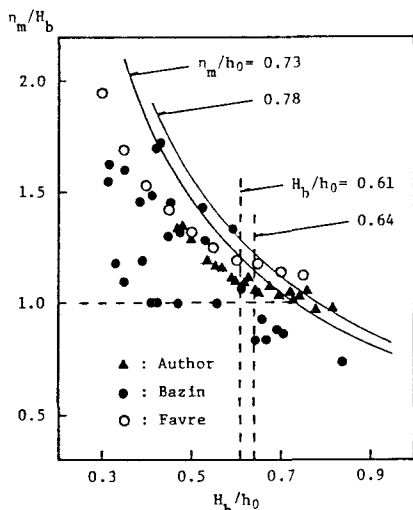


図-1 波高増幅率と初期段波波高の関係

3. 実験  
実験に使用した水路と実験方法は文献4)と同じである。これは、ダム破壊による段波が、対象段波(長い段波波長を有する一様段波)の発生させ方として、最良と思われたからである。実験ケースは、 $h_a$ を0.05と0.06mの2種類、 $h_1$ を0.10~0.17mまで0.5cmずつ変化させた、計21ケースである。ただし、各ケース、3回実験を行うことにした。測定項目は、3本の容量式波高計による段波の時間波形、モーター・ドライブ・カメラ(約5コマ/秒)による空間波形である。波高計は、波状段波の十分な発達を考慮し( $X>80h_a$ ;  $X$ :ゲートからの距離)<sup>1)</sup>、各々 $X=4m, 5m, 5.5m$ 、カメラは $X=5m$ のところに設置した。実験結果の整理は $X=5m$ のもののみを行った。 $X=4m$ と $5.5m$ での時間波形、 $X=5m$ 付近での空間波形は、波状段波か否かの判定の参考等に用いた。その結果は、 $H_b$ の5%程度の波状性を許すとして(多少の波状性や不規則性は不可避)、 $H_b/h_a>0.64\sim 0.65$ であった。ただし、得られた実験値の範囲は $0.47<H_b/h_a<0.81$ で、波状段波・段波を問わず、全てが砕波していた。本実験での波高増幅率と段波波高の関係を図-1に黒三角で示す。

#### 4. むすび

一次元、水平床で、段波下流側流速が零の場合の一般的な移動跳水発生条件は、まだ幅を有する形であるが、 $H_b/h_a>0.61\sim 0.64$ 程度と思われる。今後、ChesterやJohnson等のような理論的研究が待ち望まれる。

《参考文献》 1) 室田 明・岩田好一郎：土論集、1968. 2) Chester, W.: J.F.M., 1966. 3) Johnson, R.S.: Phys. Fluids, 1972. 4) 松富英夫：土論集、1985. 5) 都司嘉宣：科研費報告、1988. 6) Nakagawa, H. et al.: Bull. Disas. Prev. Inst., 1969. 7) Keulegan, G.H. & G.W. Patterson: J. Res. Nat. Bur. Stand., 1940. 8) 本間 仁・安芸蛟一編：物部水理学、1972. 9) Peregrine, D.H.: J.F.M., 1966. 10) Binnie, A.M. & J.C. Orkney: Proc. Roy. Soc., A, 230, 1955. 11) 土屋義人・山下隆男・今塩宏之：第34回海講、1987.