跳水長の定義と式に関する文献調査結果報告

日本大学工学部　正員○藤　田　　豊
日本大学工学部　正員　安　田　禎　輔

まえがき　跳水長に関しては，残念ながら理論式はほとんど見あたらないが，数多くの実験式が提案されている．しかし，これらの実験式による計算結果には，式によりかなりの差が生じる．実際に跳水長を正確に測定することは困難であるかも知れないが，測定結果に大いに個人差が生じるのは測定の困難さだけではなく，長さの定義が定まっていないためとも考えられる．水平水路の跳水ならいざしらず，傾斜水路上の跳水は，跳水長が分からなければ対応水深は勿論，損失水頭すら計算できないのは云うまでもない．そこで標記の調査を行ったが，本報は，安田がｓ60.12 東北水工研究会で報告した内容の一部である．

1．文献調査結果　調査した文献は，主に水理学の専門書で一部を除き現在市販されている教科書や参考書類で跳水について触れているものであり，手近にあった40冊の専門書である．調査項目は跳水長に関する1)理論式，2)実験式，3)定義，および現象の分類などに関する4)現象，5)その他であり，さらに各項目の内容について調査した．40冊中，跳水長に触れているものが24冊で60% 残り16冊中，跳水現象の分類に触れているもの 2冊，対応水深に触れているもの40冊全部，損失水頭に触れているものはほとんど全てであった．

1) 理論式（ 8冊，20% ） 理論式を示したものは皆無，理論式に関して触れているものは40冊中 8冊で20% その主な内容を示せば以下の通りである． ① 椿は流速分布を仮定し，水頭損失はReynolds応力によるとして計算した結果Bahkmeteffの実験値とよくあった．[5] ② 跳水の長さは，流速分布を仮定しない限り，一次元解析法では理論的に求められない．[10] ③ 跳水の長さＬについては，流速分布に関する仮定を導入しなければ計算できない．[11] ④ l は不連続部分の長さであるから数理的に求めるのは難しいものと思わなければならない．[7] ⑤ 理論的に簡単に決定することは不可能である．[6] ⑥ 理論的には現在解明されていない．[9] ⑦ いまのところ，跳水長を完全に理論的に求める方法はない．[8] ⑧ 現在の段階では跳水の長さを理論的に求めることはできない．[4] 文献5 に椿は流速分布を仮定し理論式を求めたとしてあるが，椿自身の著書[12,13]には，紹介されていない．流速分布を仮定すれば，理論式を求められるのではないかとするものが2件[10,11]，理論的に求めるのは難しいとするものが 2件[6,7]，現在のところ理論的に求めることはできないまたは求まっていないとするものが 3件[4,8,9]である．以上の調査より，現在のところ跳水長の理論式はほとんどなく理論的に求めることも相当に困難と推定され，実験式に頼らざるを得ないものと思われる．

2) 実験式（24冊，60%）　跳水長を実験式または図などにより示しているものは40冊中24冊で60%であり跳水長に触れているもの全てがなんらかの形で実験式を示している．式の種類は全部で15種あり，これらの式のうちから著者の好みにより 1～8 個の式を列記し，1 冊平均 2～3 個の式が示されている．表－１は１冊に示されている実験式の個数と頻度である．表－２は15種の実験式を頻度順に列記したものである．ただし,Safranez や Ludinなどのように同一研究者の式として複数個あるものは，それぞれの頻度の合計がその研究者の頻度とし，式中の記号を以下に示す．　L_j:跳水長，F_1:射流部のフルード数　，$\lambda=F_1{}^2$，h_1:射流水深，h_2:常流水深，v_1:射流部の流速，v_c:限界流速，i:水路勾配

以上の結果より最も人気のある式はSmetana，Safranez(1)，Woycickiなどの式である．水力発電の分野では，最も簡単な形の Safranez の（１）式を利用しているが，どの式が信頼できるのか迷わされてしまう．

3) 跳水長の定義（21冊，52.5%） 跳水長の定義に関し図または文章などでわずかでも触れているものは，40冊中21冊で52.5%であり，実験式を示したもの24冊に対して87.5%である．しかしこの定義はまちまちで曖昧である．これらの結果をまとめると表－３となる．文章で定義されたものの主な内容は次の通りである．

式の個数	1	2	3	4	5	6	7	8	式と図表	図表のみ	計
冊　数	6	3	5	3	2	0	1	1	(9)	3	24

表－１　　注)（　)内は重複しているもの

① 跳水の長さは跳水の上流端から渦の水面上の下流端までの距離と定義され多くの実験式が提案されている．[1]
② $(h-h_1)/(h_2-h_1)=0.98$になるまでの距離が跳水の長さLj であり，表面渦の長さをL_Rとすれば，$F_1>4$になると$Lj=L_R$となる．[5] ③ 跳水の長さは，その前面からローラーのすぐ下流の水面上の点までの距離と定義される．[6] ④ 跳水に必要な距離を跳水長と呼び，この区間ではかなり急な逆水面勾配をするから，上部の水は流れに逆らって崩れ込み，激しい回転流と泡立ちを生じて，射流の運動エネルギーの大部分を散逸する．[8] ⑤ 表面渦の長さ．[18] ⑥ 渦の長さすなわち遷移区間．[19]

以上の定義によると，跳水長Lj は表面渦の長さ[1,6,18,19]と思われるが，文献 5では跳水長と表面渦の長さを明確に区別しており，また文献 8では必ずしも表面渦の長さとはかぎらない．一方，図による定義になると，表－4に示されているようにさらにまちまちで曖昧である．

表－4においては一応6つのタイプに分類したが，さらに厳密に分類すればタイプの数は倍増する．

研究者名	実験式	度数
Safranez(1) (2) (3)	$Lj = 4.5\ h_2$ $Lj = 6\ h_1\ F_1$ $Lj = 5.2\ h_2$　　計18	11 5 2
Smetana	$Lj = 6(h_2 - h_1)$	16
Woycicki	$Lj = \{8 - 0.05(h_2/h_1)\} \times (h_2 - h_1)$	9
Bakhmeteff	$Lj = (4.5\sim5)h_2$	4
Ivanchenko	$Lj = 10.6\ F_1^{-0.37}(h_2 - h_1)$	4
Einwachter (1) (2) (3)	$Lj = \{15.2-0.241(h_2/h_1)\} \times \{1-\lambda(h_1/h_2)^2\}(h_2-h_1)$ $Lj = 9\ h_1(F_1 - 1.57)$ $Lj = \psi\{(h_2 - h_1) -(1-h_1/h_2)(V_1^2/g)\}$	2 2 1
Ludin(1) (2) (3)	$Lj = (1/4.5 - 1/6F_1)^{-1} \times (h_2 - h_1)$ $Lj = (4.5 - V_1/Vc)h_2$ $Lj = g\ h_2 V_1/(2V_1 - 1.5Vc)$	2 1 1
Bureau of Reclamation	$Lj = 6.9(h_2 - h_1)$	3
Bradly & Peterka	$Lj = (6.1 + 4i)h_2$	1

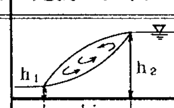
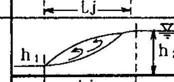
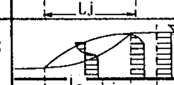
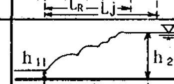
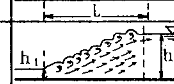
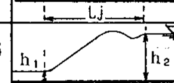
表－2　　ψ:ある関数

4) 跳水現象（13冊，32.5%） 跳水現象に触れているものは40冊中13冊であり，そのほとんどがフルード数による現象の分類で，波状跳水，弱跳水，動揺跳水，定常跳水，強跳水の５種類に分類しているが，それらの現象の説明はまちまちである．わが国におけるこれらの分類法は Ven Te Chow の著書によるものと推定されるが，これらの著者自身の実験や観察によるものはないようである

図のみで定義したもの	16冊	76.2%
図と文章で定義したもの	5	23.8
文章のみで定義したもの	1	4.8

表－3

5) その他 その他として２件あったが，その内容を示すと次の通りである． ① 運動量の保存則というのは力学上の最も基本におかれる性質である．しかし，跳水の場合なぜこれを基本におくとうまくいくのかということはわからない．[7] ② 跳水現象を水深の関係から研究したものは数多くあるが，表面渦の長さについての研究は割に少ない．[16]

No.	定義のタイプ	参考文献
1		1., 2, 8., 15 16,17, 19, 20 21,22
2		9,12(1),13(1),23
3		5.　$F_r>4$ になると $Lj = L_R$
4		3 , 4(2)
5		6.
6		7 , 14

表－4　注）17: 渦の長さ=遷移区間

まとめ　跳水現象はもはや平均的取扱では充分解決済みと解釈されがちであるが，以上の調査結果から分かるように充分に解決されたとは考えられない．のみならず未だ跳水長の定義すらまちまちで不明確である．まして跳水長を理論的に求めることは甚だ困難で，実験式に頼らざるを得ないのが現状である．しかしその実験式は種種雑多で十数種におよび，それらの式による計算結果には相当に差が生じ信じがたい．実際に跳水の長さを正確に測定することは困難であるが，測定結果に個人差が生じるのは測定の困難さだけではなく，長さの定義が定まっていないためとも考えられ，その結果様様な式が提案されたものと考えられる．