

II-19

波状跳水と境界層の相互干渉に関する実験的研究

北海道大学工学部 高田 修二
 北海道大学工学部 森平 宏治
 北海道大学工学部 正 員 森 明巨
 北海道大学工学部 正 員 板倉 忠興

1. はじめに

跳水は上流フルード数が限界フルード数 F_c を越えると碎波する。開水路において側壁の効果がない場合には $F_c \approx 1.21 \sim 1.26$ である。側壁の効果加わると F_c はこれより大きくなる。例えばChow¹⁾によれば $F_c = 1.7$ である。

著者ら²⁾は、この現象が跳水と境界層との相互干渉（以下、JBIと略称する）に関わっていることを実験的に示すことができたが、流体力学的な内部構造の解釈については不十分であった。

本研究では、レーザー流速計により跳水内部の流速を測定し、これにもとづいて高フルード数での跳水の非碎波機構について1つのモデルを提案したものである。

2. 高フルード数の波状跳水とJBI

著者らは、これまでに2種類の実験A、Bを行っている。

実験Aは水路下流端をセキあげた流れであり、実験Bは水路中央に幅3.6cmの平板を水路床に対して30度傾けておき、これを低下させて水面を抑えたものである。水理条件は両実験とも同じで、水路幅 $B = 28\text{cm}$ 、勾配 $I = 1/120$ 、流量 $Q = 3.71/\text{s}$ 、上流水深 $h_1 = 1.97\text{cm}$ 、 $F = 1.53$ である。両実験とも波状跳水が発生するが、物理的機構は同じである。

実験Bにおいて $D_0 \rightarrow$ 小とすると、平板前面において流れは碎波するが、 D_0 をある程度以上大きくすると碎波は消滅して三次元波状跳水に移行する。著者らは、この移行過程の水面形を細かく観察して、JBIの作用によって碎波が消滅することを見い出した。JBIには側壁近傍に発生するS-JBIと、水路中央の河床近傍に発生するC-JBIがあるが、両者がカップリングして非碎波化がなされる。このとき、次の2点がkey pointになっていると考えられる。

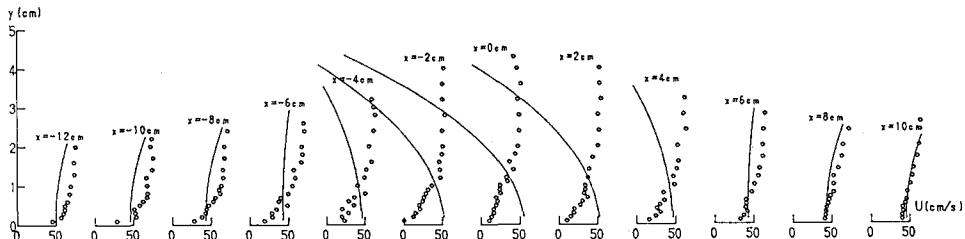


図-1

Experimental study on interaction between undular jump and boundary layer
 by Shuji TAKADA, Kouji MORIHIRA, Akio MORI and Tadaoki ITAKURA

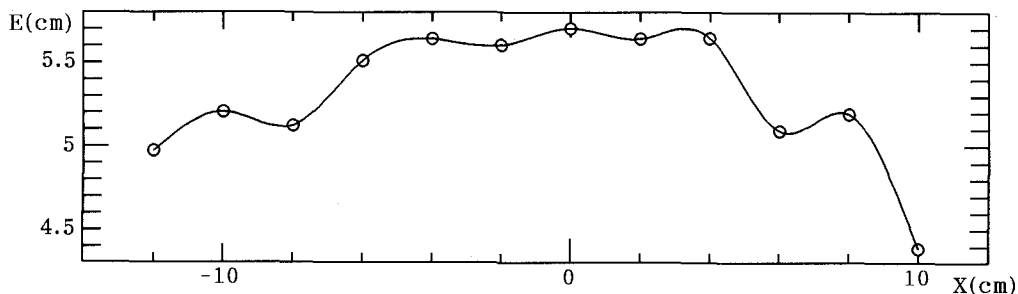


図-2

1) エネルギー分布：図-1は実験Aで測定された水路中心線上のU-分布である。図中の実線は孤立波の理論値である。peakの水面付近で $U < 0$ になり、理論的には砕波が発生することになる。しかし、図からわかる様に実測値は $U > 0$ となっている。図-2はこのときの水面におけるエネルギー $E = U^2/2g + h$ の変化をプロットしたものである。流下とともにEが増加して、砕波を妨げている。開水路流では、普通Eは水面付近で最大である。従って、このような地点でのE増大には特別な機構を考えなければならない。

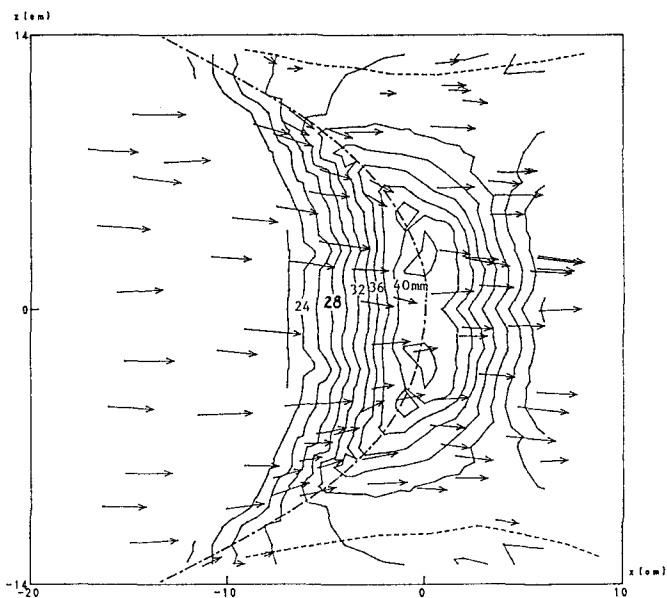


図-3

2) 圧力分布：図-3は実験Bで作られた水位コンターに表面流速ベクトルを重ねたものである。図からわかる様に流れは強い三次元構造を持っている。図によれば、跳水peakの水深 h_p は $h_p/h_1 = 2.20$ である。横断方向に平均した水深の最大値 $\bar{h}_p$ は $\bar{h}_p/h_1 = 1.88$ である。

一次元の跳水では、下流側水深 h_2 は $F = 1.53$ のとき

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} (\sqrt{1+8F^2} - 1) = 1.72 \quad \text{となる。}$$

これらの値を比較すると、跳水波面には上流に伝播するのに十分な圧力が加わっていると考えられる。

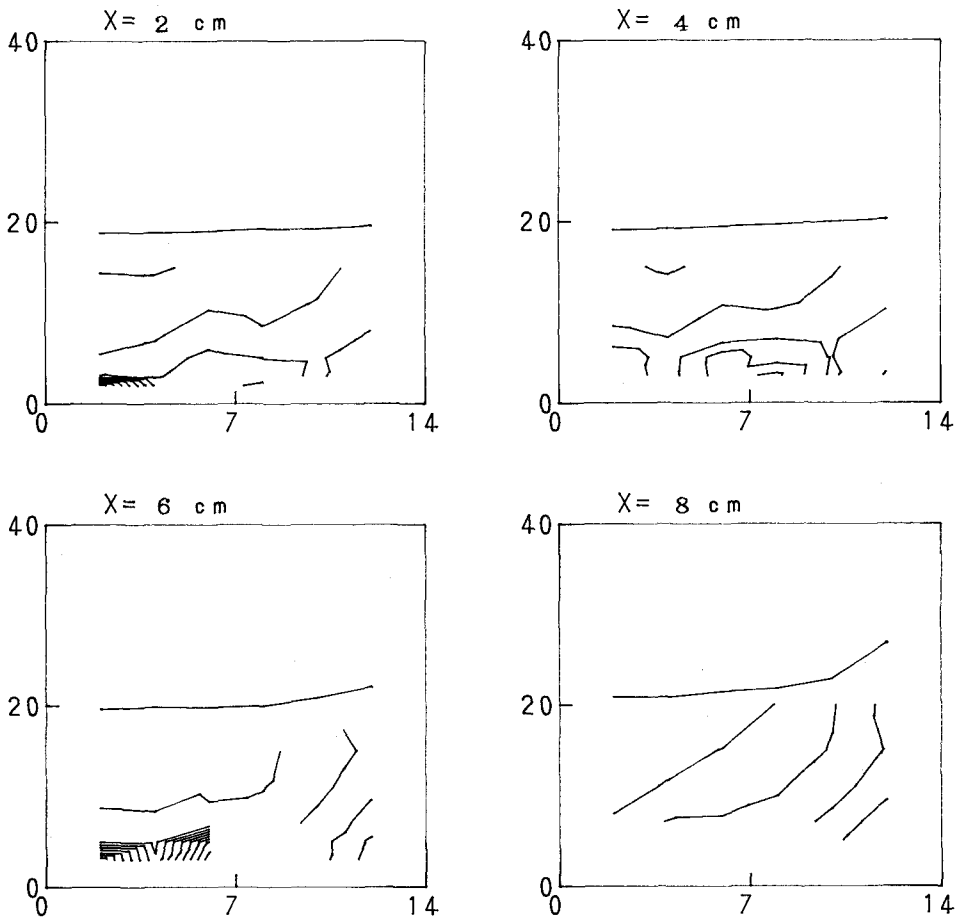
3. モデルの提案

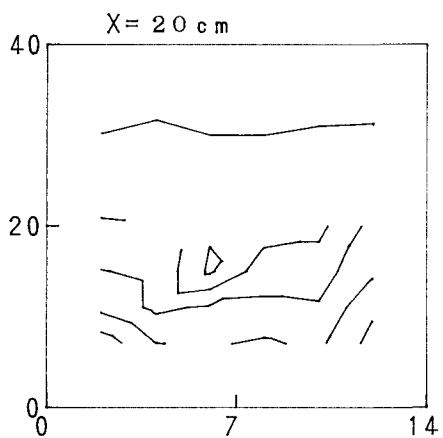
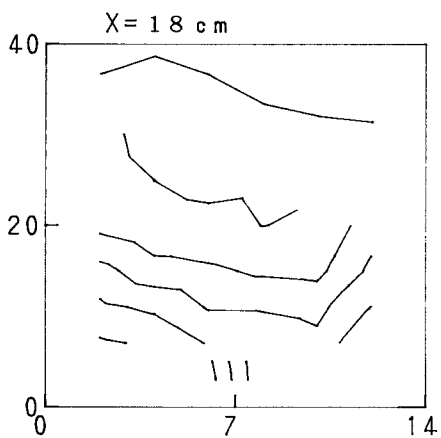
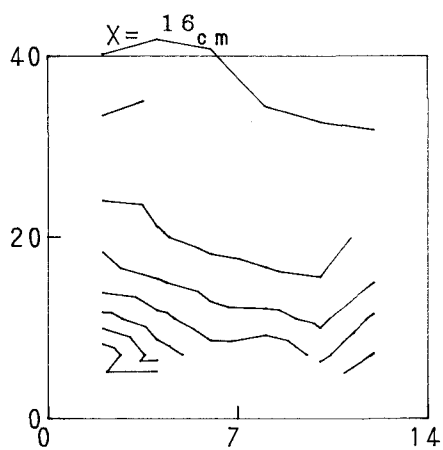
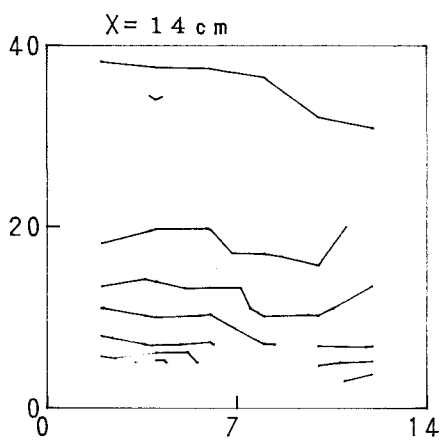
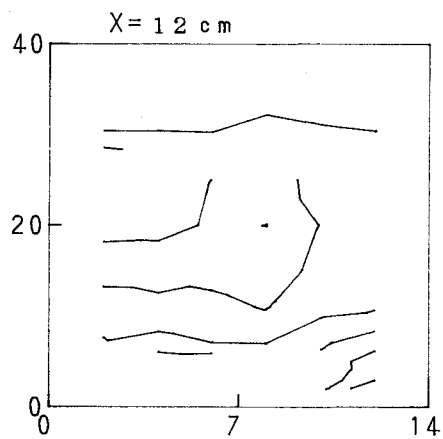
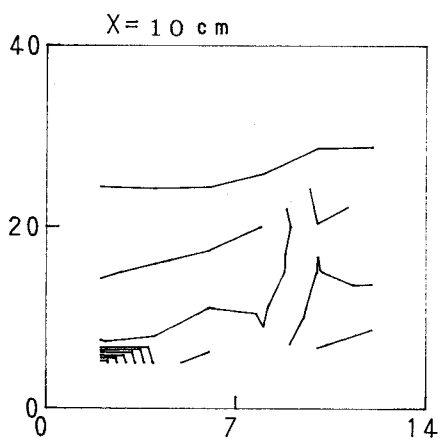
以上のこれまでの実験結果に対する考察と今回新たに加えた流速測定結果から、以下の様な碎波抑制モデルを考えた。

セキ設定によって発生した段波が、一定距離上流に伝播した後には停止して非碎波の波状跳水となる場合、一次元跳水理論との比較から明らかなように、運動量fluxと圧力は平衡せず、高波高に伴う圧力は跳水波面を更に上流に伝播させるpotentialがある。

実際に跳水波面が上流に伝播するなら碎波する。しかし、強いJBIが発生している場合には、JBI作用により、河床と側壁を通してこの過剰potentialが上流に輸送される。これに伴うJBI域の非静水圧の増加がS-JBI域では流れを水路中央方向に運び、C-JBI域では流れを鉛直方向に運ぶ。これらの作用によって跳水のpeakを形成する流体のEが増加する。簡単に言うと、高波高の跳水がJBIを通じて上流側流体に作用して、自らの波高を維持するということである。

図-4





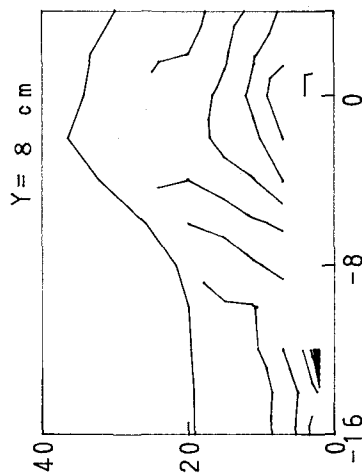
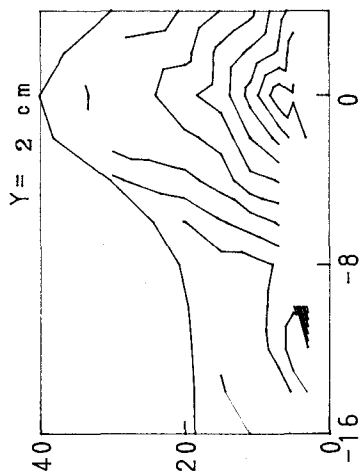
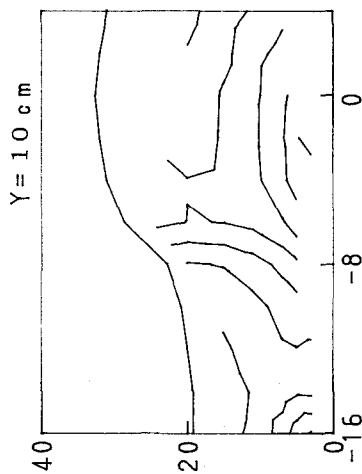
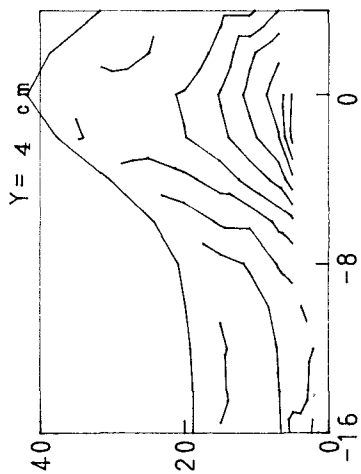
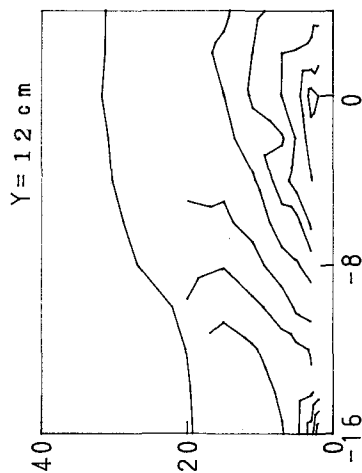
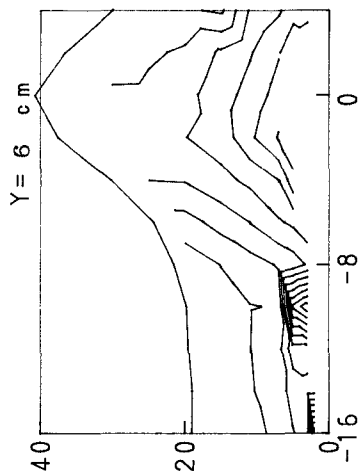


图 - 5

4. 跳水の内部構造

レーザー流速計により流下方向成分 U を測定した。測定範囲は、 $y = 2\text{cm}$ から 12cm 、 $x = -16\text{cm}$ から 4cm までで、それぞれ 2cm 間隔である。 x の原点は跳水のpeak地点、 y の原点は水路中央である。図-4, 5は得られた U の横断面及び縦断面の等流速線図である。図-4からわかる様に $S-JBI$ による低流速域が流路中央に向かって張り出してくる。また、 $C-JBI$ によって、低流速域が上方に広がる。図-5からわかる様に、 JBI による U の変化は急激である。

著者らは、この様な流速の急変が上流からの高速流と下流からの過剰圧力流体の衝突によって生ずるものとする。この過剰圧力流は、上流からの流体を上方に持ち上げることによってエネルギーを解放する。

この近傍の流れを染料によって可視化すると、間欠的に強い上昇流が発生している。すなわち、Burstと類似な現象が生じて流体を上方に輸送している。河床付近の U -分布が、図-1に見られる三角形分布の低速域を持つのはこのためであろう。この様なBurst的な輸送は、水面付近では充分ではないであろう。図-1にみられる様に、 U 分布の最大点は水面下になっているのはこのためと考えられる。水面付近の流れはmoundを登る様な形になるが、水面下の高速流により運動量が供給されて砕波しないものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、横断方向の流速 V も測定する予定であった。しかし、乱れが著しく強く、様々な流向、流速を持った粒子が混合しているため V は測定できず、 U も河床付近と水面の一部が測定不能であった。

参考文献

- 1) Chow, V.T.: Open-channel Hydraulics, McGraw-Hill, 1959.
- 2) 森 明巨、板倉 忠興、森平 宏治、高田 修二：跳水と境界層の相互干渉—三次元波状跳水， 1991.