

転波列性サージの卓越周期の生成に関する一検討

名城大学 正会員 新井宗之

1. はじめに

豪雨等による自然災害の中で土石流に代表される土砂流災害は、人命に大きな被害を与える場合があり一つの特徴的な事でもある。土石流の流下現象については、近年の計測技術等の発達により、多くの流下現象が捉えられるようになった。これらによると土石流の流下現象が単一の流下現象ばかりでなく、短時間に複数あるいは多数の流下現象である場合も珍しくないことが報告されて来ている。そしてこのような流下現象が豪雨時ばかりでないことも報告されている。このような、短時間に複数あるいは多数のサージ状の流下現象は、従来の堆積層の静的な安定条件に基づく考えではその現象の説明に困難がある。

著者らは、このような間欠的なサージ流下現象は流れの不安定性による一種の非線形波動現象であることを示している。しかし、まだ不明な点が多い。本研究では、実験水路で生成された転波列が上流から下流への流下とともにその周期が長くなることについて、実験結果と波動方程式 Burgers 方程式の解との関係について述べる。

2. 実験の概要

実験水路は図-1に示すような長さ 56m, 幅 10cm, 深さ 15cm の透明硬質アクリル製の直線水路で、水路底部も硬質アクリル製の滑面、水路勾配が $\theta=2.5^\circ$ の水路である。給水方式は、循環式ではなく上流端の給水タンクから水路へ給水するもので、上流端の水槽容量は $500\ell(0.5\text{m}^3)$ であり、水路に約 120 秒間給水して実験を行うものである。また、この給水用水槽は、密閉式でマリOTT瓶の原理により、一定の圧力を保つようにされており、一定流量を給水するようになっている。流下平均流量は、この水槽からの給水時間と給水量から得たもので、この実験では平均流量 $Q = 1177.4\text{cm}^3/\text{s}$ である。水路下流端より 2m 上流側での平均水深は $h_0 = 1.19\text{cm}$ であり、平均流量と平均水深、水路幅から、平均流速は $v = 98.9\text{cm}/\text{s}$ である。給水開始から水路下流端までの流下時間は約 56sec であり、給水の時間は流れの平均流下時間の約 2 倍程度である。サージの流下過程を調べるために、水路側面からの動画撮影記録により水面変動を測定した。測定位置は上流端から下流へ $x=14, 24, 34, 44, 54\text{m}$ の 5 点である。図中に NO.1~5 の下方矢印で示している。撮影画像は 120fps で画像間の時間間隔は $\delta t = 1/120\text{sec}$ である。画像の解像度は垂直方向で約 $\delta y = 0.03\text{cm}$ 程度である。水深変動のための画像解析は独自の解析プログラムを開発し解析に供した。

Keyword: 土砂流サージ, 転波列, 実験, 周期, 流下過程
〒468-8502 愛知県名古屋市中白区塩釜口 1-501 Tel: 052-838-2364

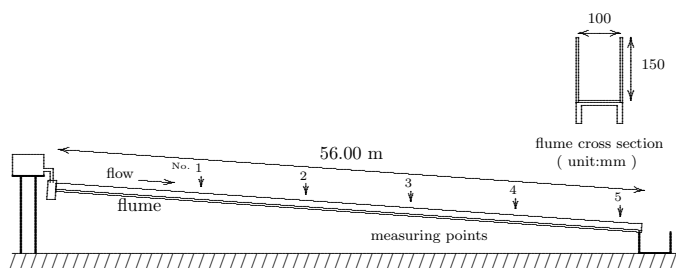
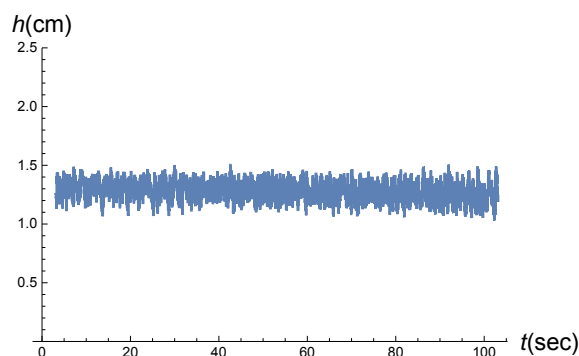
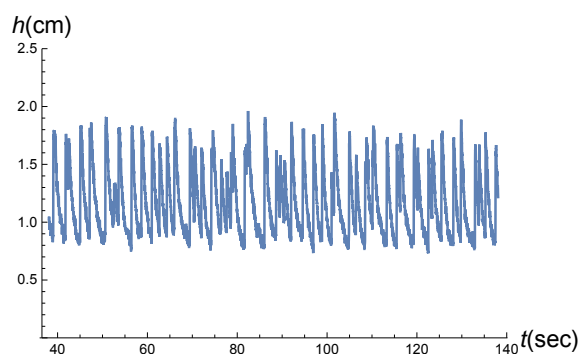


図-1 実験水路概念図



(a) $x=14\text{m}$



(b) $x=54\text{m}$

図-2 実験結果例

3. 実験結果および考察

実験結果の例を図-2に示す。(a)は水路上流端から $x = 14\text{m}$ の位置での水深変化を示し、(b)は $x = 54\text{m}$ の位置の水深変化である。横軸は、 $x = 14\text{m}$ の位置において流れの先端が到達した時刻を $t = 0\text{sec}$ とした時間を表し、縦軸は水路床からの水面の位置を表している。いずれも約 100 秒間の流れの水深変化を示している。時間を長く示しているため (a) の $x = 14\text{m}$ での水深変化が誤差変動のようにも見えるが周期が短いためである。(b) の $x = 54\text{m}$ での水深変化は周期が長くなるため、変化の形状が分かる。

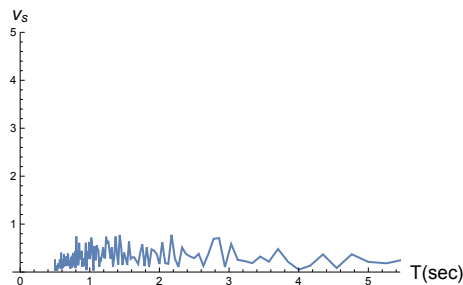
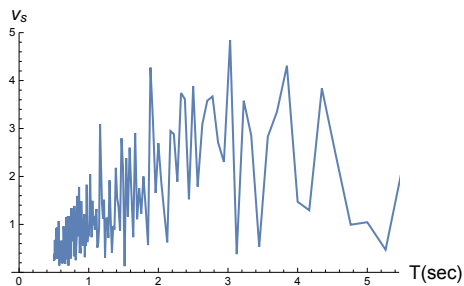
(a) $x=14\text{m}$ (b) $x=54\text{m}$

図-3 水深変動のフーリエ解析例

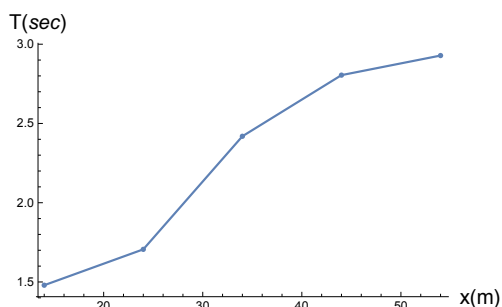


図-4 卓越周期の流下変化

ここで、このような水深変動の周期の変化を知るためにフーリエ解析を用いる。長さ n (個) のデータ u_r のフーリエ解析 v_s は、 s を波数とすると

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{r=1}^n u_r e^{2\pi i(r-1)(s-1)/n} \quad (1)$$

で定義される。

図-3 は水路上流端から $x=14, 54\text{m}$ の位置での解析結果で、横軸を周期 $T(\text{sec})$ で表した図である。フーリエ解析は式(1)で定義されるように、波数 s とその波数の寄与の大きさを表す v_s の関係として得られるが、図-2 に示す 100sec 間の水深変化より、波数 s を水深変動の波形の周期 $T(\text{sec})$ として表している。この結果から、(a) の $x=14\text{m}$ では卓越した周期はほとんど無く多くの周期がほぼ同じような形で波形を形成していることを示している。一方、(b) の $x=54\text{m}$ では周期が $T=3\text{sec}$ のあたりで v_s の値が大きくなり、寄与が大きくなっていることを示している。

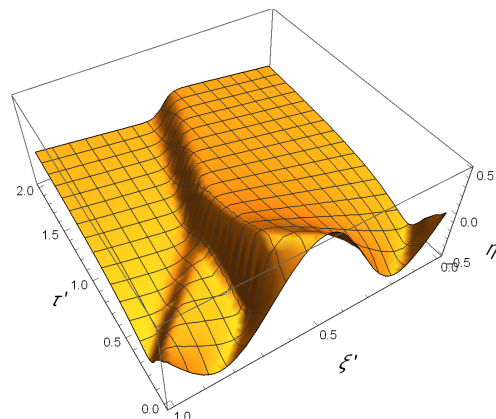


図-5 Burgers 方程式の解析例

図-4 はフーリエ解析結果から、波形に寄与する周期の大きい順から 3 番目までの周期の平均値を上流から下流にどのように変化するかを示している。横軸に水路上流端からの距離 $x\text{m}$ 、縦軸に周期 $(T)\text{sec}$ を示している。この結果によると、 $x=30\text{m}$ より下流で水深変化に寄与する周期が急速に長くなることを示している。

このようなことがどのような機構で生じて行くのか検討する。転波列性のサージ生成の支配方程式として一種の KdV-Burgers 方程式を著者らは導いているが、位相速度が長波の速度の場合、次式のような Burgers 方程式となる。

$$\frac{\partial \eta'}{\partial \tau'} + \frac{3}{2} \eta' \frac{\partial \eta'}{\partial \xi'} - \frac{1}{4} \frac{\tan \theta}{u_0'} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial \xi'^2} = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\eta' = \eta/h_0$ 、 η は平均水深 h_0 からの変動量、 $\tau' = \epsilon^{3/2} t'$ 、 $t' = t(v_{p0}/h_0)$ ：無次元時間、 $\xi' = \epsilon^{1/2}(x' - t')$ 、 $x' = x/h_0$ ： x の無次元表示。

図-5 は、波数が $k=3/2$ の場合で、初期条件が $\eta'(\xi', 0) = -(1/2)\sin(3\pi\xi')$ 、 $(1 \geq \xi' \geq 0)$ 、境界条件は非固定境界条件で、 $\eta'(0, \tau') = \eta'(1, \tau')$ の計算結果で、無次元周期(波長 L)を $L=1$ とした計算結果である。図の奥行き方向に無次元時間 τ' による波形の時間変化、横軸は流下方向の無次元量 ξ' 、縦軸は平均水深からの無次元変移量 η' を示している。この過程の結果をみると一つの波形が他の波形を結合して波数 $k=1$ の波形を形成していくことを示している。つまり、水面変動の波形は一つ一つの周期が長くなるのではなくある周期の波形が他の波形を結合して周期の長くなる波形を形成して行くと考えられる。

4. まとめ

転波列性サージの先端部から約 100 秒のサージの周期を解析するとともにし、このような波動の支配方程式の一つと考えられる Burgers 方程式の解析から、ある周期の波形が他の波形を結合して周期の長くなる波形を形成して行くと考えられることを示した。

参考文献: 1) 新井宗之, 安田孝志, 中川一: 山地河道における浅水流に関する波動方程式の導出とその解析解の検討, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I-961-I-966, 2013.