名城大学理工学部	正会員	新井宗之
岐阜大学工学部	正会員	安田孝志
名城大学理工学部	学生員	石川雄規
名城大学理工学部	学生員	久野浩太

## 1. まえがき:

中国・雲南省の蒋家溝で観測される粘性土石流に代表さ れるように、多数の土石流サージとして流下する現象があ る.日本では、鹿児島県・桜島の野尻川等で泥流状の転波列 性土石流が観測されている.また、ヨーロッパでもオース トリアの Bodenkultur Wien 大学 Alpine Naturgefahren 研究 所などでも、同国内の西部山岳地域での観測施設で間欠的 な多数の土石流サージ流下を観測している.これらの転波 列性サージは、粘性土石流のような微細粒子を高濃度に含 む土石流の固有な現象ではなく、流れの不安定性に基づく 現象でどのようなタイプの土石流でも発生する可能性があ る.しかし、その流下特性については十分明らかではない <sup>1)</sup>.そこで、本研究では転波列性サージの波動性について明 らかにすることを目的とし、ここではサージ先端部の位相 速度について検討するものである.

## 2. 転波列性サージの波速

急変する水面変動を考慮した一次元流れの運動方程式,お よび連続式は次式のように表わされる.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \beta v \frac{\partial v}{\partial x} + (1 - \beta) \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial t} = g \sin \theta - g \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f'}{2} \frac{v^2}{R}$$
(1)  
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (A v)}{\partial x} = 0$$
(2)

ここに, *v* : 断面平均流速, *A* : 流積, *g* : 重力加速度, *θ* : 水路勾配, *R* : 径深, *h* : 水深, *β* : 運動量補正係数, *f*' : 摩擦損失係数.

運動方程式の左辺第1項は加速度項,第2項は移流項, 第3項は流積の変動による応力項,右辺第1項は水路勾 配により生じる質量力の成分,右辺第2項は水面勾配に よる圧力差としての作用力,第3項は底面摩擦応力によ る抵抗項である. 波速 c により,流速 v および水深 h を  $v(x,t) = U(x - ct) = U(\xi), h(x,t) = H(x - ct) = H(\xi),$  $\xi = x - ct$ により移動座標系で表わすと,運動方程式,連続 式は次式のようになる.

$$c\frac{\partial U}{\partial \xi} - \beta U \frac{\partial U}{\partial \xi} + c \left(1 - \beta\right) \frac{U}{A} \frac{\partial A}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \xi}$$
$$= -g \sin \theta + g \cos \theta \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{f'}{2} \frac{U^2}{R} \qquad (3)$$

$$\left(U-c\right)\frac{\partial A}{\partial H}\frac{\partial H}{\partial \xi} + A\frac{\partial U}{\partial \xi} = 0 \tag{4}$$

式 (3), (4) および進行流量 (*c* – *U*)*A* = *K*<sub>A</sub> = const. の関係を 用いると水面形の式として次式を得る.

$$\frac{\partial H}{\partial \xi} = -\frac{A\left\{g\sin\theta - \frac{f'}{2}\frac{1}{R}\frac{\left(cA - K_A\right)^2}{A^2}\right\}}{\left\{\beta\left(\frac{K_A}{A}\right)^2 + \left(1 - \beta\right)c^2\right\}\frac{\partial A}{\partial H} - gA\cos\theta}$$
(5)
$$= -\frac{f_1(H)}{f_2(H)}$$
(6)

支配断面においては、 $f_1(H) = 0$ 、 $f_2(H) = 0$ の関係がある.  $f_2(H) = 0$ の関係より、支配断面での流速を $U_0$ とすると波速 cとの関係として次式が導かれる.

$$\frac{U_0}{c} = \frac{\beta \frac{\partial A}{\partial H} - \sqrt{\beta \left(\beta - 1\right) \left(\frac{\partial A}{\partial H}\right)^2 + \frac{S}{F_r^2} \left(\frac{\partial A}{\partial H}\right)}}{\beta \frac{\partial A}{\partial H} - \frac{S}{F_r^2}}$$
(7)

ここに,  $F_r = \frac{U}{\sqrt{gH\cos\theta}}$ : フルード数, S: 潤辺.

水路断面形状を矩形断面とすると、<u>*U*</u> は次式のようになる.

$$\frac{U_0}{c} = \frac{\beta - \sqrt{\beta(\beta - 1) + \frac{S}{B}\frac{1}{F_r^2}}}{\beta - \frac{S}{B}\frac{1}{F_r^2}}$$
(8)

ここに, B:水路幅.

一方,自由水面の波動については多くのことが明らかに されている. ポテンシャル Φ を

$$\Phi = A \cosh k(y+h) \cos(kx+\omega t) \tag{9}$$

ここに, 2A' exp(*kh*), *k*: 波数, ω: 位相, *h*: 平均水位, *y*: *h* の変動分.

として,次式の線形分散関係式が得られている.

$$\omega^2 = \left(gk + \frac{T}{\rho}k^3\right) \tanh(kh) \tag{10}$$

ここに, T:表面張力, ρ:流体密度. これより,重力波(T=0)の場合,次式の関係が得られる.

位相速度 : 
$$C_p = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k} \tanh(kh)\right)^{\frac{1}{2}}$$
 (11)

群速度 : 
$$C_g = \frac{dw}{dk} = \frac{1}{2}C_p\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)$$
 (12)

表1実験条件

No.	$\theta$	Q	h	v	$d_{50}$	$\sigma$	С
	(deg.)	(cm <sup>3</sup> /s)	(cm)	cm/s	cm	g/cm <sup>3</sup>	
1	3.0	1576	1.07	147.3	-	-	0
2	3.0	1310	0.97	135.1	-	-	0
3	3.0	1122	0.89	130.6	-	-	0
4	3.0	1800	1.15	156.6	-	-	0
5	3.0	2035	1.24	164.2	-	-	0
6	3.0	852	0.78	109.3	-	-	0
7	2.5	2148	1.6	134.4	0.067	1.41	0.177
8	3.0	1931	1.6	121.0	0.067	1.41	0.071
9	3.0	2520	2.0	128.0	0.067	1.41	0.202
10	3.0	1745	1.3	134.1	0.29	1.06	0.165
11	3.0	1150	1.3	88.0	0.29	1.06	0.158

## 3. 実験の概要及び考察

実験水路は、長さ28m、幅 10.0cm、深さ 10.0cm の両側 壁透明塩化ビニール製、水路床はアルミ製の可変勾配水路 である.清水流れの場合は水路長 56m で実験を行った.流 れは水路下流端に設置されているポンプで水路上流端ま でビニールパイプで流送され, 整水槽を通して水路に供 給される循環式水路である. ポンプはボルテックス型のも ので 5mm 程度の粒子を流送可能である.実験条件を表1 に示す. No.1~N0.6 は清水で, No.7~No.11 は固体粒子を 含有した流れである.実験に使用した粒子は、石炭粒粒子 (No.7~9) およびポリプロピレン粒子 (No.10~11) で,石炭粉 粒子は中央粒径  $d_{50}$ =0.67mm, 粒子密度  $\sigma$ =1.41g/cm<sup>3</sup>, 粒子 の最充填濃度 C<sub>\*</sub>=0.57 である.また、ポリプロピレン粒子 は,長径 2.97mm,短径 2.14mm,長さ 2.97mmの円柱状の 形状で、名目直径 d は  $d_{50}$ =2.9mm、粒子密度  $\sigma$ =1.06g/cm<sup>3</sup>、 粒子の最充填濃度 C<sub>\*</sub>=0.54 である.図2,図3の中のO印 は清水の流れ,●印は固体粒子を含む流れを示している.

転波列性サージの流下において、時空間的平均流量と平均 水深から得られる断面平均流速を支配断面の流速  $U_0$  とし、 サージ先端部の流下速度の時空間的平均を移動座標系の速 度 c とすると、式 (8) と実験結果の  $\frac{U_0}{c}$  の関係を図 2 に示す. 横軸は式 (8) による  $\left(\frac{U_0}{c}\right)_t$ ,縦軸は実験結果の  $\left(\frac{U_0}{c}\right)_e$  である. ただし、運動量補正係数  $\beta$  は、清水および固体粒子を含む 場合のいずれも  $\beta$  = 1.02 を用いている. この図の結果は、  $\beta$  = 1.02 程度で比較的よく一致することを意味しているも のである. 一方、線形分散関係式の重力波 (T = 0) の位相速 度  $C_p$  と、流れの断面平均速度 v の移動座標系におけるサー ジ先端部の位相速度 (c - v) の関係を図 3 に示す. 横軸が式 (11) による  $C_p$  であり、縦軸が実験結果の c - v である. 式 (11) による位相速度  $C_p$  と実験結果の (c - v) は比較的良い 一致を示しているが、実験結果の方が少し大きな値の傾向を



示している.また,群速度  $C_g$  との関係は図に示していないが,位相速度  $C_p$  とほぼ同じ結果である.さらに, $kh \ll 1$ であることより,浅水波の位相速度,群速度の  $\sqrt{gh}$  とも非常に近い値である.これらより,流れの不安定性による転波列の生成によるサージ状の流れは弱い分散性の重力波としての波動を示すものである.

参考文献:1)新井宗之,水山高久:転波列性泥流のサージ 波長に関する基礎的検討,土木学会論文集,A2(応用力学), Vol.67, No.2, pp.345-354, 2011.9.