

津波遡上への氾濫水密度の影響*

中央大学研究開発機構 松富英夫

1. はじめに

松富ら¹³⁾は歴史津波や想定津波の規模評価の高度化を目指し、小規模移動床実験に基づいて、津波遡上距離(～遡上高)や土砂堆積距離・津波遡上距離比(≤ 1)、平均土砂堆積厚・土砂堆積距離比の氾濫水密度 ρ への依存性を検討してきている。しかし、小規模移動床実験の常としてスケール効果が危惧され、実験結果の定量性・普遍性に難があると思われる。この一解決方法として対象事象に対する理論的な検討が考えられる。

本研究は津波遡上に的を絞り、最大遡上距離や遡上高、遡上過程に対する氾濫水密度の影響を理論的に検討し、これらに対する知見の充実を図ることを目的とする。

2. 理論

図-1に示す一樣勾配斜面上の津波氾濫を検討対象とする。入射津波は氾濫水深や遡上距離にピークを有し、戻り過程をも表現できるShenら⁴⁾やPeregrineら⁵⁾のDam break flowとする。彼らのDam break flowの解の導出についてはMatsumoto⁶⁾、解の諸特性については梅野ら⁷⁾に詳しい。氾濫流中に土砂を含ませるため、Whitham⁸⁾のように氾濫流先端部のみに底面摩擦抵抗を導入する。また、氾濫流先端部における流れ方向の氾濫流速 $U(t)$ は一様と仮定する。

氾濫流先端部における質量 M の保存則は次式である。

$$\frac{dM}{dt} = \int_{\xi}^{x_s} \frac{d(\rho h_p)}{dt} dx - (\rho h_p)_{x=\xi} \frac{d\xi}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\xi}^{x_s} \rho h_p dx \quad (1)$$

ここで、 t は時間、 x_s は斜面に沿う空間座標軸上の位置、 h_p と x_s は摩擦がない場合の氾濫流の任意位置における氾濫水深と先端位置、 ξ は摩擦がある場合の先端部の後端位置で、先端部後端位置から流入する質量は静水の質量であるが、先端部内で直ぐに底面から土砂を取り込み、土砂水の密度(氾濫水密度)になるとを考えている。

氾濫流先端部における運動量 P の保存則は、 K を移動床下の氾濫流(非定常流)の摩擦損失係数⁹⁾とすれば、

$$\frac{dP}{dt} = U \frac{d}{dt} \int_{\xi}^{x_s} \rho h_p dx + \frac{1}{2} \rho_w g H^2 - igM - \rho K U^2 (a - \xi) \quad (2)$$

ここで、 ρ_w は清水の密度、 g は重力加速度、 H は先端部後端位置における氾濫水深、 i は斜面勾配、 a は氾濫流の先端位置である。式(2)において、右辺第1項は底面由来の流入運動量を含む。第2項は清水による静水圧としており、先端部の後端位置で圧力の不連続が生じる不完全な先端部モデルと判断するかもしれない。本研究では先端部の氾濫水密度は空間平均的なものとして考えている。

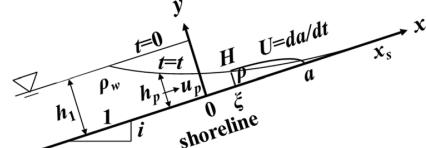


図-1 入射津波氾濫流の初期条件と諸記号の定義

$P=MU$ の関係を用いれば、式(1)と(2)から次式を得る。

$$\left[\int_{\xi}^{x_s} h_p dx \right] \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho_w g H^2 - ig \left[\int_{\xi}^{x_s} h_p dx \right] - K U^2 (a - \xi) \quad (3)$$

任意の時間と位置におけるShenらやPeregrineらのDam break flowの氾濫水深 h_p と氾濫流速 u_p は次式である。

$$h_p = \frac{1}{9g} \left(2c_1 - \frac{x}{t} - \frac{1}{2} igt \right)^2 \quad (4)$$

$$u_p = \frac{2}{3} \left(c_1 + \frac{x}{t} - igt \right) \quad (5)$$

ここで、 $c_1 = gh_1$ 、 h_1 は初期の貯水深(=汀線での入射段波高)である。したがって、氾濫流先端部の後端位置 ξ における氾濫水深 H と流れ方向の氾濫流速 U は次式となる。

$$H = \frac{1}{9g} \left(2c_1 - \frac{\xi}{t} - \frac{1}{2} igt \right)^2 \quad (6)$$

$$U = \frac{2}{3} \left(c_1 + \frac{\xi}{t} - igt \right) \quad (7)$$

また、摩擦がない場合の氾濫流の先端位置 x_s と摩擦がある場合の先端部後端位置 ξ は次式となる。

$$x_s = 2c_1 t - \frac{1}{2} igt^2 \quad (8)$$

$$\xi = \left(\frac{3}{2} U - c_1 + igt \right) t \quad (9)$$

したがって、先端位置 $a(t)$ の最大の値域 $a = 0 \leq a \leq 2h_1/i$ (=摩擦がない場合の値)で、式(3)は次式となる。

$$\begin{aligned} & \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right)^3 t \frac{d^2 a}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{\rho_w}{\rho} \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right)^3 \\ & + ig \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right)^3 t + Kg \left\{ a - \left(\frac{3}{2} \frac{da}{dt} - c_1 + igt \right) t \right\} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)が本研究の解くべき式で、解く際に土砂の移動限界は考慮しない。摩擦がなく、土砂を氾濫流中に取り込まない場合は $\rho/\rho_w=1$ で、式(10)から式(8)の解が得られる。

* Effect of the density of inundation water on tsunami run-up by Hideo MATSUTOMI

3. 級数解

式(10)を解くにあたり次の無次元量を導入する。

$$\alpha = \frac{K}{h_1} \left(2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - a \right) \quad (11) \quad \tau = \sqrt{g/h_1} K t \quad (12)$$

ここで、 $a \geq 0$ で、摩擦がない場合とある場合（氾濫水密度が増加）の無次元氾濫流先端位置の差を示す。これらの導入により、式(10)は次式となる。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{d\alpha}{d\tau} \right)^3 \left(\frac{d^2\alpha}{d\tau^2} \right) \tau + \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho} \left(\frac{d\alpha}{d\tau} \right)^4 \\ & + 8 \left\{ \alpha - \frac{3}{2} \frac{d\alpha}{d\tau} \tau \right\} \left(2 - \frac{i}{K} \tau - \frac{d\alpha}{d\tau} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

また、Whitham⁸⁾にならう次の変数変換を行う。

$$p = \frac{d\alpha}{d\tau} \quad (14) \quad \tau = f'(p) = \frac{df}{dp} \quad (15)$$

ここで、 p の変域は $0 \leq p \leq 2$ である。これらの変換から次の関係式が得られる。

$$\frac{d^2\alpha}{d\tau^2} = 1 / \frac{d^2f}{dp^2} \quad (16) \quad \alpha = pf' - f \quad (17)$$

したがって、式(13)は次の f に関する式となる。

$$p^3 f' + \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho} p^4 f'' - 8 \left\{ f + \frac{1}{2} p f' \right\} \left(2 - \frac{i}{K} f' - p \right)^2 f''' = 0 \quad (18)$$

式(18)を解くにあたり f に関して p の級数解を仮定する。

$$f(p) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n p^n \quad (19)$$

初期条件 $\tau=0$ ($t=0, p=0$) のとき、 $\alpha=da/dt=0$ から、 $b_0=b_1=0$ を得る。これらを考慮し、式(19)を式(18)に代入して得られる恒等式を解けば $b_2=b_3=0$ が得られ、有意な解を与える最終的な恒等式は次式となる。

$$\begin{aligned} & (4b_4 + 5b_5 p + 6b_6 p^2 + 7b_7 p^3 + \dots) p^6 \\ & + \frac{\rho_w}{\rho} \left(3b_4 + 5b_5 p + \frac{15}{2} b_6 p^2 + \frac{21}{2} b_7 p^3 + \dots \right) p^6 \\ & \left[\begin{array}{l} 1,152b_4^2 \\ + 192(17b_4b_5 - 6b_4^2)p \\ + 32(9b_4^2 - 102b_4b_5 + 138b_4b_6 + 70b_5^2)p^2 \\ - 16 \left(51b_4b_5 - 276b_4b_6 + 360b_4b_7 \right) p^3 + \dots \end{array} \right] p^6 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)から例えれば係数 $b_4 \sim b_8$ として次式群が得られる。

$$b_4 = \frac{1}{1,152} \left(4 + 3 \frac{\rho_w}{\rho} \right) \quad (21) \quad b_5 = \frac{1,152b_4^2}{(3,264b_4 - 5 - 5\rho_w/\rho)} \quad (22)$$

$$b_6 = \frac{64(9b_4^2 - 102b_4b_5 + 70b_5^2)}{(12 + 15\rho_w/\rho - 8,832b_4)} \quad (23)$$

$$b_7 = \frac{32(51b_4b_5 - 276b_4b_6 - 140b_5^2 + 370b_4b_7 - 288b_4^3)i/K}{(14 + 21\rho_w/\rho - 11,520b_4)} \quad (24)$$

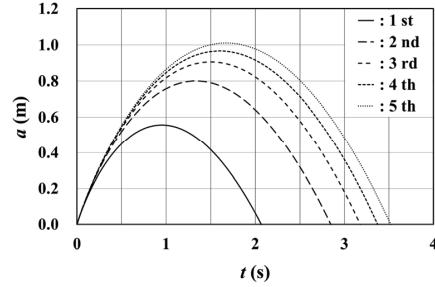


図-2 泛濫流先端位置 a に関する級数解式(26)と(29)の収束性の検討例 ($h_1=0.09$ m, $i=0.05$, $K=0.008$, $\rho/\rho_w=1.1$)

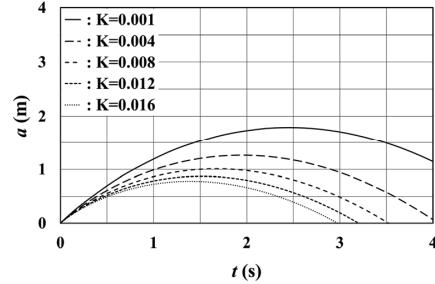


図-3 泛濫流先端位置 a の摩擦損失係数 K への依存性の検討例 ($h_1=0.09$ m, $i=0.05$, $\rho/\rho_w=1.1$, 第5次近似)

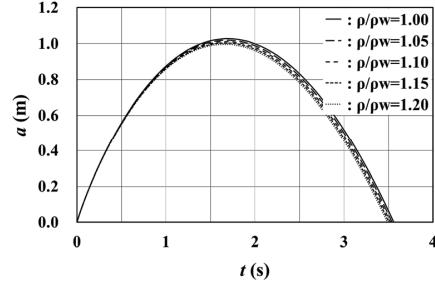


図-4 泛濫流先端位置 a の氾濫水密度 p への依存性の検討例 ($h_1=0.09$ m, $i=0.05$, $K=0.008$, 第5次近似)

$$b_8 = \frac{8 \left(69b_4b_6 - 360b_4b_7 + 35b_5^2 - 370b_5b_6 + 474b_5b_7 + 240b_6^2 + 24b_4^2(6b_4 - 49b_5)i/K \right)}{(4 + 7\rho_w/\rho - 3,648b_4)} \quad (25)$$

以上から、任意の h_1, i, K （斜面状態に依存）に対する氾濫流の先端位置 $a(t)$ と先端部における流れ方向の氾濫流速 $U(t)$ および加速度 d^2a/dt^2 の級数解としてそれぞれ次式が得られる。参考までに K や ρ は時間変化してもよいが、それらの時間変化は不明である。

$$a = 2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - \frac{h_1}{K} (3b_4 p^4 + 4b_5 p^5 + 5b_6 p^6 + 6b_7 p^7 + \dots) \quad (26)$$

$$U = \frac{da}{dt} = 2c_1 - i g t - c_1 p \quad (27)$$

$$\frac{d^2a}{dt^2} = -ig - \frac{Kg}{12b_4 p^2 + 20b_5 p^3 + 30b_6 p^4 + 42b_7 p^5 + \dots} \quad (28)$$

$$t = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{h_i}{g}} (4b_4 p^3 + 5b_5 p^4 + 6b_6 p^5 + 7b_7 p^6 + \dots) \quad (29)$$

氾濫流先端位置の級数解である式(26)と(29)の収束性の検討例を図-2に示す。図から、係数 b_8 までの第5次近似を採用すれば級数解が十分に収束（第4と5次の差は4.6%）することが判る。したがって、本章の以下の計算例では第5次近似を示す。また、氾濫流先端位置の遡上過程と戻り過程が線対称でないことも判る。

第5次近似を採用した式(26)と(29)の計算例を図-3と4に示す。これらの図から、(1)最大遡上距離ばかりでなく、最大遡上に要する時間や遡上継続時間（ $a(t)>0$ の時間）も摩擦損失係数 K に依存すること、(2)摩擦損失係数 K と氾濫水密度 ρ （または比重 ρ/ρ_w ）が運動せず、氾濫水密度だけが変化する場合、遡上への氾濫水密度の影響は非常に小さいこと（後述の図-8参照）が判る。(2)は移動床下の土砂を含む氾濫流の先端位置 $a(t)$ の評価では氾濫水密度 ρ と摩擦損失係数 K の運動が重要であることを示す。

図-5～7に順に氾濫流先端部の先端位置 $a(t)$ と後端位置 ξ の関係、後端位置 ξ における氾濫水深 H 、流れ方向の氾濫流速 U 、加速度 d^2a/dt^2 、入射フルード数 F_n （正值であるが、 U の方向を考慮した表示）の経時変化例を示す。省略されているが、初期の入射フルード数は無限大である。

4. 解析解

前章において土砂を含む氾濫流の解析では氾濫水密度 ρ と摩擦損失係数 K の運動が重要であることを指摘した。

松富⁹によれば、適用範囲は未定であるが、氾濫水密度 ρ は式(30)に示すように移動床下の土砂を含む氾濫流の摩擦損失係数 K と入射フルード数 F_n で評価できる。

$$\rho = \rho_w / (1 - K F_n^2) \quad (30)$$

したがって、式(30)から理解されるように、移動床下の任意の流れ（任意の F_n ）において氾濫水密度を議論することは摩擦損失係数 K を議論することに他ならない。

本研究では入射フルード数 F_n を式(31)に示すように氾濫流先端部における流れ方向の氾濫流速 U と後端位置 ξ での波速 C （式(32)参照）で定義する。

$$F_n = U/C \quad (31) \quad C = \sqrt{gH} = \frac{1}{3} \left(2c_1 - \frac{\xi}{t} - \frac{1}{2} igt \right) \quad (32)$$

この定義の入射フルード数は氾濫流先端部における最大の氾濫水深 H を採用しているので小さめである。入射フルード数を大きめ、換言して先端部の代表氾濫水深を小さめに定義すれば、摩擦損失係数 K は小さくなり（式(30)参照）⁹、氾濫流は流れ易くなる（ F_n の定義に依存する）。

式(31)、(32)と(9)から次式を得る。

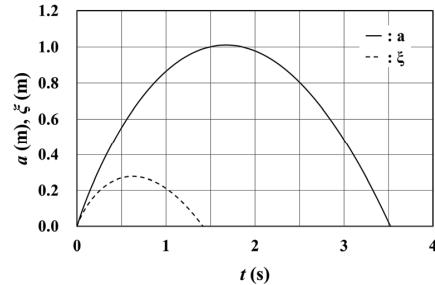


図-5 気溢流先端部の先端位置 a と後端位置 ξ の経時変化例 ($h_i=0.09\text{m}$, $i=0.05$, $K=0.008$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。第5次近似)

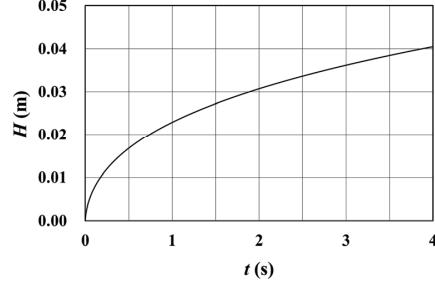


図-6 気溢流先端部の後端位置 ξ における氾濫水深 H の経時変化例 ($h_i=0.09\text{m}$, $i=0.05$, $K=0.008$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。第5次近似)

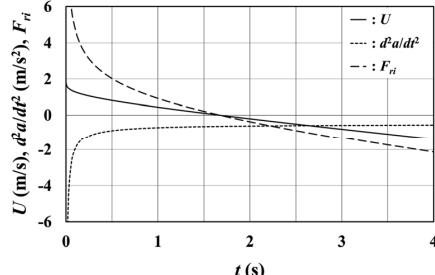


図-7 気溢流先端部における流れ方向の氾濫流速 U と気溢流先端部の後端位置 ξ における入射フルード数 F_n の経時変化例 ($h_i=0.09\text{m}$, $i=0.05$, $K=0.008$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。第5次近似)

$$F_n = \frac{U}{C} = \frac{2U}{(2c_1 - U - igt)} \quad (33)$$

したがって、摩擦損失係数 K は次式となる。

$$K = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \frac{1}{F_n^2} = \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \frac{(2c_1 - U - igt)^2}{4U^2} \quad (34)$$

式(34)を式(10)に代入すれば、本章における解くべき（摩擦損失係数 K を含まない）式として次式を得る。

$$\begin{aligned} & \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right) t \frac{d^2a}{dt^2} - \frac{1}{2} \frac{\rho_w}{\rho} \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right)^2 \\ & + ig \left(c_1 - \frac{1}{2} \frac{da}{dt} - \frac{1}{2} igt \right) t + \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) g \left\{ a - \left(\frac{3}{2} \frac{da}{dt} - c_1 + igt \right) t \right\} = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)を解くにあたり、前章とほぼ同じであるが、摩擦損失係数 K を含まない次の無次元量を導入する。

$$\alpha = \frac{1}{h_1} \left(2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - a \right) \quad (36) \quad \tau = \sqrt{g/h_1} t \quad (37)$$

これらの導入により、式(35)は次式となる。

$$\frac{d\alpha}{d\tau} \frac{d^2\alpha}{d\tau^2} \tau + \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho} \left(\frac{d\alpha}{d\tau} \right)^2 + 2 \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \left(\alpha - \frac{3}{2} \frac{d\alpha}{d\tau} \tau \right) = 0 \quad (38)$$

また、前章と同様に式(14)と(15)に示した変数変換を行えば、式(38)は次式となる。

$$pf' + \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho} p^2 f'' - 2 \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \left(f + \frac{1}{2} pf' \right) f'' = 0 \quad (39)$$

式(39)を式(19)に示した p の級数解を仮定して解くこととする。

初期条件 $\tau=0$ ($t=0, p=0$) のとき、 $\alpha=da/dt=0$ から、 $b_0=b_1=0$ を得る。これらを考慮し、式(19)を式(39)に代入すれば、有意な解を与える最終的な恒等式として次式を得る。

$$(2b_2 + 3b_3 p + 4b_4 p^2 + 5b_5 p^3 + 6b_6 p^4 + \dots) p^2 \quad (40)$$

$$+ \frac{1}{4} \frac{\rho_w}{\rho} (2b_2 + 6b_3 p + 12b_4 p^2 + 20b_5 p^3 + 30b_6 p^4 + \dots) p^2$$

$$- 2 \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \left(\begin{array}{l} 4b_2^2 + 17b_2 b_3 p + (30b_2 b_4 + 15b_3^2) p^2 \\ + (47b_2 b_5 + 48b_3 b_4) p^3 \\ + (68b_2 b_6 + 71b_3 b_5 + 36b_4^2) p^4 + \dots \end{array} \right) p^2 = 0$$

式(40)から級数解の係数として次式群が得られる。

$$b_2 = \frac{1}{16} \frac{(4 + \rho_w/\rho)}{(1 - \rho_w/\rho)} \quad (41)$$

$$b_3 = b_4 = b_5 = b_6 = \dots = 0 \quad (42)$$

これらの結果は、 ρ をある一定値とした場合、級数解を仮定しなくても式(35)または式(39)が解けることを示す。

以上から、氾濫流の先端位置 $a(t)$ は p をパラメータとして次式となる。

$$a = 2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - h_1 (b_2 p^2) \quad (43) \quad t = \sqrt{h_1/g} (2b_2 p) \quad (44)$$

最終的に任意の h_1 と i に対する氾濫流の先端位置 $a(t)$ と先端部における流れ方向の氾濫流速 $U(t)$ および加速度 d^2a/dt^2 の解析解としてそれぞれ式(45)～(47)が得られ、先端位置の軌跡は放物線で、流れ方向の氾濫流速は直線的に減少することが判る。

$$a = 2c_1 t - \frac{1}{2} i g t^2 - 4 \frac{(1 - \rho_w/\rho)}{(4 + \rho_w/\rho)} g t^2 \quad (45)$$

$$U = \frac{da}{dt} = 2c_1 - i g t - 8 \frac{(1 - \rho_w/\rho)}{(4 + \rho_w/\rho)} g t \quad (46)$$

$$\frac{d^2a}{dt^2} = -ig - 8 \frac{(1 - \rho_w/\rho)}{(4 + \rho_w/\rho)} g \quad (47)$$

また、最大遡上距離 a_m と遡上高 R_m としてそれぞれ次式が得られる。

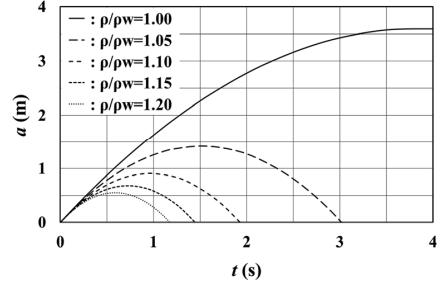


図-8 氾濫流先端位置 a の氾濫水密度 ρ への依存性の検討例 ($h_1 = 0.09$ m, $i = 0.05$)

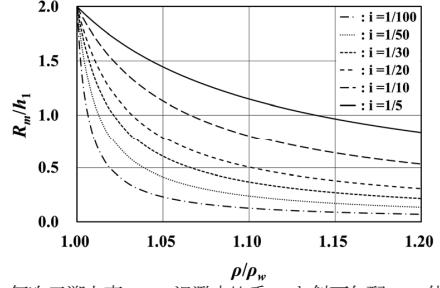


図-9 無次元遡上高 R_m/h_1 の氾濫水比重 ρ/ρ_w と斜面勾配 i への依存性

$$a_m = \frac{2h_1}{i + 8(1 - \rho_w/\rho)/(4 + \rho_w/\rho)} \quad (48)$$

$$R_m = \frac{2h_1}{1 + (8/i)(1 - \rho_w/\rho)/(4 + \rho_w/\rho)} \quad (49)$$

氾濫水の比重 ρ/ρ_w をパラメータとした場合の式(45)の計算例を図-8に示す。実際は摩擦損失係数 K と同様に氾濫水の比重も経時変化する。図中の実線は摩擦がない、すなわち土砂を氾濫流中に取り込まない場合の式(8)に他ならない。図から、氾濫水密度が高くなるにつれて、最大遡上距離ばかりでなく、最大遡上に要する時間や遡上継続時間も短くなることが判る。これらの傾向は摩擦損失係数が大きくなる場合と同じである(図-3参照)。

また、遡上と戻り過程の全体にわたって摩擦損失係数 K を一定にしている図-3の結果との比較から、図-8の結果は最大遡上距離の割合で遡上継続時間が短いことが判る。これは氾濫流の状況に応じた時々刻々に変化する摩擦損失係数を用いる必要がある¹⁰ことを示唆している。

斜面勾配 i をパラメータとした場合の式(49)の計算例を図-9に示す。図から、無次元遡上高 R_m/h_1 が氾濫水の比重 ρ/ρ_w と斜面勾配 i に大きく依存することが判る。

図-10～12に順に氾濫流先端部の先端位置 $a(t)$ と後端位置 ζ の位置関係、後端位置 ζ における氾濫水深 H 、流れ方向の氾濫流速 U 、加速度 d^2a/dt^2 、入射フルード数 F_n の経時変化例を示す。これらにおいて特筆的なことは、氾濫水深 H が下に凸(級数解の場合は上に凸)の経時変化を示し、最大遡上距離後もその状態は変わらず、物理的に

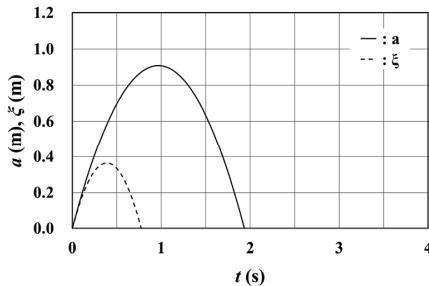


図-10 沔溢流先端部の先端位置 a と後端位置 ξ の経時変化例 ($h_1=0.09\text{ m}$, $t=0.05$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。解析解)

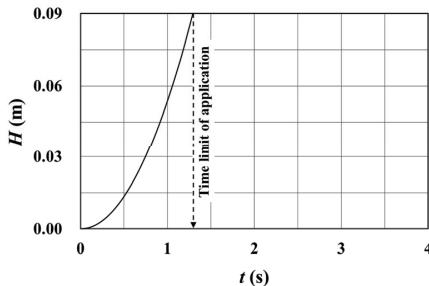


図-11 沔溢流先端部の後端位置 H における氾濫水深 H の経時変化と適用限界例 ($h_1=0.09\text{ m}$, $t=0.05$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。解析解)

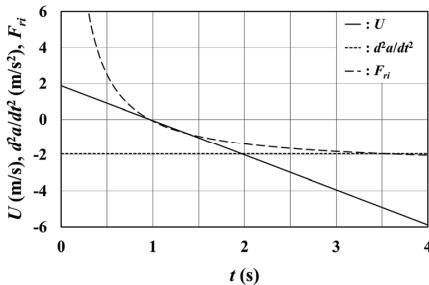


図-12 沔溢流先端部における流れ方向の氾濫流速 U と氾濫流先端部の後端位置 H における入射フルード数 F_r の経時変化例 ($h_1=0.09\text{ m}$, $t=0.05$, $\rho/\rho_w=1.1$ 。解析解)

おかしい大きな氾濫水深となることである。この理由は式(30)の導入にある。式(30)において氾濫水密度 ρ として一定値(遡上過程における平均値)を与える場合、入射フルード数 F_r が大きく(小さく)なれば、摩擦損失係数 K は小さく(大きくなる)。したがって、一定値の摩擦損失係数を与える場合に比べて、遡上過程の初期段階では氾濫流速 U が大きく、最大遡上距離近くになれば氾濫流速が急激に小さくなる(図-5と10参照)。この状況は、先端位置 $a(t)$ の軌跡が放物線であることから理解されるように、戻り過程においても同じである。このため、戻り過程において氾濫流速が大きくなつていけば、式(6)と(9)、(46)から得られる氾濫水深 H に関する式($H=16g(1-\rho_w/\rho)^2t^2/(4+\rho_w/\rho)^2$)から理解されるように、氾濫水深が氾濫流速に対応して大きくなつていく。以上から、式(30)の適用範囲は戻り過程の氾濫流速がある大きさになるまでと言える。この適用限界は本研究の目的遂行に支障をきたさない。とは言え、式(30)の適用法に改善が望まれる。

表-1 土砂水の氾濫流の遡上実験条件とその結果例³⁾

Case	h_D (m)	L_U (cm)	h_U (cm)	h_T (cm)	L_S (m)	h_s (cm)	i	ρ (g/cm^3)	L_R (cm)
2-2	12	30	25	6	155	23	0.127	1.092	117
2-4								1.102	101
2-6								1.136	95
2-8								1.158	111
Mean	-	-	-	-	-	-	-	1.122	106

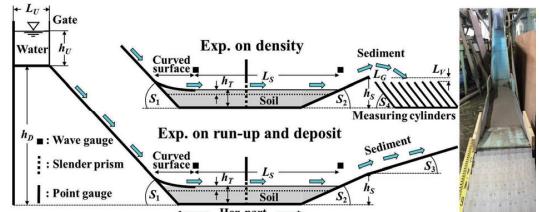


図-13 実験水路の概略(水路側壁は省略), 正面写真(右端), 測定器具などの配置と諸記号の定義(勾配 $S_2=0.208$)

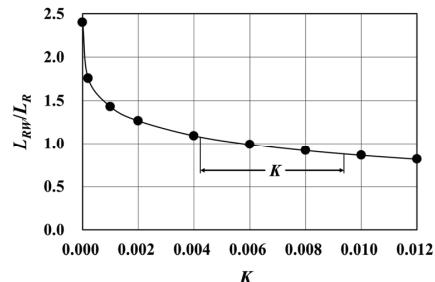


図-14 摩擦損失係数 K 毎の清水の最大遡上距離 L_{rw} と実験で得た土砂水の氾濫流の最大遡上距離 L_R の比 ($h_1=0.162\text{ m}$, $t=0.127$, $\rho/\rho_w=1.0$ 。第5次近似)

($4+\rho_w/\rho$)²から理解されるように、氾濫水深が氾濫流速に対応して大きくなつていく。以上から、式(30)の適用範囲は戻り過程の氾濫流速がある大きさになるまでと言える。この適用限界は本研究の目的遂行に支障をきたさない。とは言え、式(30)の適用法に改善が望まれる。

5. 解の検証

実験値との比較・検討を通して級数解と解析解の有用性を検証する。ただし、利用できる実験値が限られ、実験条件と理論で想定している条件を完全に一致させることができないため、厳密な検証ができない状況にある。

松富ら¹³⁾は土砂を含む氾濫流の遡上に関する実験データを提示している。そのデータ例と使用した実験装置の概略をそれぞれ表-1と図-13に示す。氾濫流はゲート急開流れである。表中のCase番号は参考文献³⁾のものと同じで、 h_D は貯水槽の底面高、 L_U は貯水長、 h_U は貯水深、 h_T は初期土砂層域厚、 L_S は初期土砂層域長、 $i (=S_2)$ は氾濫流が遡上する後半部斜面の勾配である(図-13参照)。

具体的な検証手順は次の3 Stepである。

Step 1 : 解析解である式(48)において、氾濫水の比重 $\rho/\rho_w=1.122$ (4回の平均値)、斜面勾配 $=0.127$ とし、土砂を含む氾濫流の最大遡上距離 a_m が実験で得た $L_R=1.06\text{ m}$ (4回の平均値)と一致する h_i を評価する。

Step 2 : Step 1で評価した h_i の場合の清水 (固定床下) の氾濫流が遡上するときの摩擦損失係数 K を実験で使用した遡上斜面の状態 (斜面に粒径が0.85~2 mmの砂を貼付け³⁾) から推定する。

Step 3 : 級数解である式(26)と(29)において、 $\rho/\rho_w=1.0$ 、 $\mu=0.127$ とし、Step 1と2で評価した h_i と K を用い、級数解から得られる最大遡上距離 L_{RW} が実験で得た $L_R=1.06\text{ m}$ より大きいか検証する。

Step 1における h_i の評価値として0.162 mを得る。このときの最大遡上時は遡上開始時を $t=0$ として $t=0.842\text{ s}$ である。

Step 2における摩擦損失係数 K の推定は、固定床下でさえも氾濫流 (非定常流) の抵抗則はよく判っておらず、非常に難しい問題である。そこで、本研究では先ず固定床下の定常流に対する抵抗則を用いてこの場合の摩擦損失係数 K_0 を評価し、この K_0 に非定常性に対する補正係数を考慮することで最終的な摩擦損失係数 K を推定する。

固定床下の定常流に対する代表的な抵抗則として次式に示す広矩形開水路の粗面則がある。

$$K_0 = \left(6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{h_i}{k_s} \right)^{-2} \quad (50)$$

ここで、 h_i は定常流の水深、 k_s は相当砂粒粗度である。

式(50)の水深 h_i として対象氾濫流における遡上時の $x=0$ での最大入射氾濫水深 $=4h_i/9=0.0718\text{ m}$ 、相当砂粒粗度 k_s として斜面に貼付けた砂の代表粒径1.0 mm (粒径が0.85~2 mmの粒径加積曲線¹⁾の傾向から評価。中央粒径に相当) を用いる。この場合の評価結果として $K_0=0.0036$ を得る。

本研究で利用している実験値の取得時における移動床下の氾濫流と定常流の摩擦損失係数の比は12~2.6である⁹⁾。したがって、土砂水と清水の氾濫流の非定常性に対する補正係数が同じかどうか不明であるが、清水の氾濫流の摩擦損失係数 K の推定値として K_0 を12~2.6倍した0.0043~0.0094を採用する。

Step 3における検証結果を図-14に示す。図中、●は摩擦損失係数 K 毎の清水の最大遡上距離 L_{RW} と実験で得た土砂を含む氾濫流の最大遡上距離 L_R の比、実線はそれらをExcelの自由曲線で結んだもので、推定された K の域値も示されている。図から、級数解は予想 (図-8)から理解されるように清水の氾濫流の方が最大遡上距離は長い) に反して小さめ (88%) からやや大きめ (106%) の値を与えてることが判る。一層高い近似度の級数解を用いれば、これより少しきめの値を与える。したがって、予想より小さめであるが、この程度の小さめであれば、

本研究理論の有用性が確認されたと言ってもよかろう。級数解が小さめの値を与えた理由として、遡上過程において氾濫水密度 ρ を一定値にしていること、級数解における摩擦損失係数 K の推定値と実験値の正確度の問題が考えられる。今回の研究経験を通して、理論との比較・検討に一層適した実験値が必要と考えている。

6. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- (1)津波遡上の的を絞り、氾濫流の先端位置 $a(t)$ と先端部における氾濫流速 $U(t)$ および加速度 d^2a/dt^2 に関して、氾濫水密度 ρ と摩擦損失係数 K を連動させない場合は級数解 (式(26)~(29))、氾濫水密度と摩擦損失係数を連動させる場合は解析解 (式(45)~(47)) を導出し、最大遡上距離 a_m (式(48)) や遡上高 R_m (式(49))、遡上過程などへの氾濫水密度の影響を理論的に検討した。
- (2)摩擦損失係数 K を一定値にした土砂を伴う津波の遡上解析では (数値シミュレーションを含む)、最大遡上距離を正確に評価できても、遡上継続時間 ($a(t)>0$ の時間) などを正確に評価できない可能性があり (この逆も言える)、氾濫水密度 ρ と摩擦損失係数 K を連動させることが重要であることを指摘するとともに連動式の例 (式(30)) を提示した。
- (3)既報実験値³⁾との比較・検討を通して本研究で導出した土砂を含む氾濫流の先端位置 $a(t)$ に関する級数解と解析解の有用性を確認した。

謝辞: 本研究の遂行に科研費 (基盤研究(C), 17K01320, 代表: 松富英夫) の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松富英夫, 今野史子, 斎川 聖, 鎌竜孝信, 渡邊一也: 津波氾濫水密度の土砂堆積や遡上高への影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016.
- 2) 松富英夫, 今野史子, 後村晃基, 今藤晃太, 鎌竜孝信, 渡邊一也: 津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017.
- 3) Matsutomi, H. and Kondo, F.: Experiments on the density of tsunami inundation water and its influence on the tsunami run-up and deposit, Proc. of Int'l Conf. on Coastal Eng., No.36, Full Length papers: Paper 41, 2019.
- 4) Shen, M. C. and Meyer, R. E.: Climb of a bore on a beach, Part 3: Run-up, J. Fluid Mech. Vol.16, pp.113-125, 1963.
- 5) Peregrine, D. H. and Williams, S. M.: Swash overtopping a truncated plane beach, JFM, Vol.440, pp.391-399, 2001.
- 6) Matsutomi, H.: Dam-break Flow over a Uniformly Sloping Bottom, J. Hydraul. Coast. Environ. Eng. JSCE, No.726/I-62, pp.151-156, 2003.
- 7) 梅野元輝, 松富英夫: 斜面上の建築物位置における津波遡上時と遡下時の水深、流速と抗力, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, II-55, 2016.
- 8) Whitham, G. B.: The effects of hydraulic resistance in the dam-break problem, Proc. Roy. Soc. A, Vol.227, pp.399-407, 1955.
- 9) 松富英夫: 津波氾濫水密度の簡易評価法, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, pp.385-390, 2019.
- 10) 松富英夫: 陸上遡上津波の先端条件と先端部の抵抗係数, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.74-78, 1981.