

北海道大学大学院 学生員 渡部 靖憲

日本道路公団 成嶋 晋一

北海道大学工学部 正 員 浜中建一郎

1. はじめに

波は、その進行に伴って流体自身の粘性から運動エネルギーを失う。このエネルギー損失はポテンシャル流速場におけるものと、底面境界層の剪断流速場におけるものに大別され、前者は深海域において、後者は浅海域において卓越する。さらに、実海域における底面境界層のエネルギー損失は、砂漣等によって流体が乱されることで増加することが予想されるが、定量的なその分布や構造についての報告はない。

一方、著者らはこれまで砂漣上の水平振動流の数値解析を試み、砂漣上の境界層内の剥離や渦構造が再現されることを確かめてきた¹⁾。本研究は、この方法を用いて砂漣上のエネルギー損失を求め、砂漣の規模や剥離構造とエネルギー損失の関係を調べることを目的とする。また、底面が平らな場合の解析解と比較すると同時に波動場における波高減衰についても考察を加える。

2. 基礎方程式

Navier-Stokes式を基礎方程式として用いる。また、運動エネルギーの変化率は次式に従う。

$$E_t = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho |v|^2 \right) = \rho u \frac{\partial u}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1)式にN-S式を代入し、連続式を用いて整理すると

$$E_t = -\nabla \left(\rho v \left(\frac{1}{2} |v|^2 + \frac{p}{\rho} \right) - \mu v \sigma_{ij} \right) - 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 - \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2)式第2項以降が粘性によるエネルギー損失を示す。最終的にエネルギー損失 Φ は流れ関数 ψ を用いて

$$\Phi = -4\mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \right) - \mu \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

3. 水平床上のエネルギー損失の解析解

3.1 ポテンシャル波動場のエネルギー損失 微小振幅波理論を考え、進行波の速度ポテンシャルを(3)式に代入し、底面から水面までの一周期あたりのエネルギー損失 E_p を求める。

$$E_p = \int_0^T \int_0^h \Phi dy dt = -\mu \frac{\alpha^2 T}{k} \sinh 2kh, \quad \text{ここで } \alpha = \frac{Hk\sigma}{2\sinh kh} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで T :周期, h :水深, k :波数, α :流速振幅, H :波高, σ :角振動数

3.2 境界層内のエネルギー損失 水平振動流に対する1次のオーダーの流速分布は次式で表される。

$$u = \alpha (\sin \sigma t - \exp(-\beta y) \sin(\sigma t - \beta y)) \quad \text{, ここで } \beta = (\sigma/2\nu)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3.1と同様に底面から境界層外縁までの一周期あたりのエネルギー損失 E_b を求めると

$$E_b = \int_0^T \int_0^\infty \Phi dy dt = \frac{\mu \beta}{2} \alpha^2 T \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、 $E_b/E_p > 1$ なら境界層内のエネルギー損失が、 $E_b/E_p < 1$ ならポテンシャル波動場のそれが卓越することを意味する(図1)。

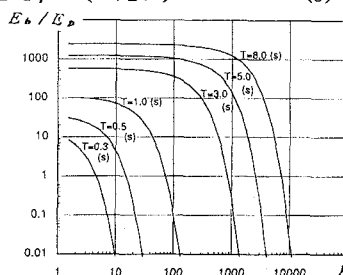


図1. 水深、周期と卓越するエネルギー損失の関係

4. 結果と考察

砂漣上の半周期間の各位相におけるエネルギー損失の等高線を図2に示す。この時の条件は $a \cdot k_R = 0.5$, $\alpha = 5$, $\nu = 0.05$ (a : 砂漣波高, k_R : 砂漣波数, α : 流速振幅, ν : 無次元動粘性係数) であり、砂漣波高、波数、流速振幅の関係は実海域におけるそれとほぼ同等のものである。また、 ν の値が小さいほど水面波の波長に対して砂漣の波長が大きいという意味を持つ。これらのエネルギー損失の様子は、流体の渦度の様子(図3)と類似しており、剥離などの流れの様子と密接に結び付いていると考えられる。図4は、同じ条件での砂漣一波長にわたって積分した各位相におけるエネルギー損失の高さ方向の分布である。全ての位相において底面上のエネルギー損失が水平床上のものと比較して倍以上になっており、特に(a)~(b)にみられる加速期から最大流速期にかけては、高さ方向にもその顕著な分布がみられ、剥離または境界層厚の発達が寄与していることを表している。図5には、砂漣一波長の総エネルギー損失の一周期間にわたる時間変化を表した。 $a \cdot k_R$ が大きくなると急激にエネルギー損失が増加し鋭いピークを持つようになる。このピークは加速期にみられ、剥離する以前に強い剪断流が発生し総エネルギー損失が最大となることを表している。また、図6は砂漣上の総エネルギー損失 E_R と水平床上の総エネルギー損失 E_b の比と $a \cdot k_R$ の関係をプロットしたものである。 E_R/E_b は、 $a \cdot k_R$ の増大に伴い放物的に増加するが、実海域に対応すると考えられる $a \cdot k_R = 0.5$, $\alpha = 5$ の時、水平床上と比べて2倍以上のエネルギー損失をもつことは注目すべき点である。また、 $\nu = 0.02$ の場合、 $a \cdot k_R$ が大きいものは計算していないが、さらに大きいエネルギー損失が発生する可能性がある。

エネルギー損失の直接的な影響としては、波高の減衰がある。これらの解析結果から凹凸のある底面では、実験室規模で一波長分の減衰率は0.5%~2%、標準的な水路終端では初期波高の5%~20%まで減衰するという結果が得られた。

5. まとめ

- ・剥離を伴う砂漣上の境界層内のエネルギー損失は、空間的には強い渦度及び剥離が生じている所に集中し、時間的には流速の加速期にピークを持つ。

- ・砂漣等の凹凸を持つ海浜または実験水路では、エネルギー損失は水平床の倍以上となり、特に模型縮尺の大きい水路については波高減衰に注意する必要がある。

《参考文献》

- 1) Hamanaka, k. and Sato, Y. (1992) ;Quasi-turbulent boundary layer of oscillating flow over ripples , I. C. C. E. 92
- 2) 浜中建一郎, 佐藤幸雄(1992) ;砂漣上の振動流境界層, 海岸工学論文集, 第39巻 (1), pp1-5

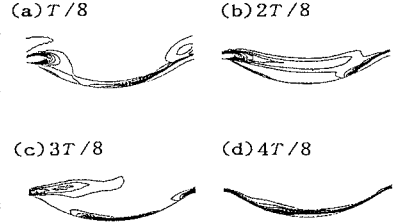


図2. エネルギー損失の等高線

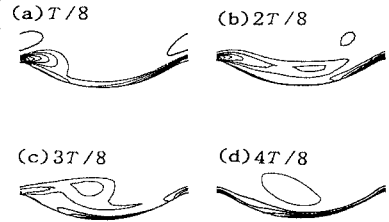


図3. 渦度の等高線

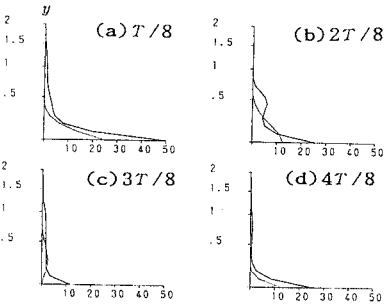


図4. エネルギー損失の y 軸方向分布

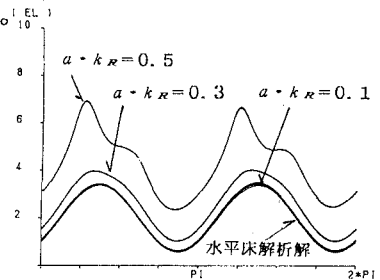


図5. エネルギー損失の時間的変化

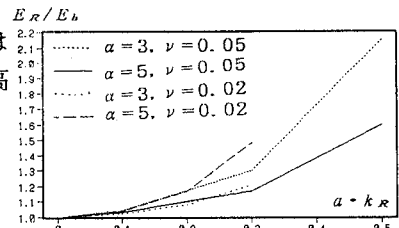


図6. 水平床と砂漣上の総エネルギー損失比