

和歌山工業高等専門学校 正員 ○木村一郎 京都大学工学部 正員 細田 尚
京都大学工学部 正員 村本嘉雄 東京電力 正員 安永 良

1. はじめに 開水路主流・死水域界面付近にはせん断不安定に起因する大規模渦が発生し、死水域内には周期的な水面振動が起こる。これらの現象はフルード数の影響を受けることが従来の研究により指摘されている[1]。そこで、死水域内の水面振動とフルード数の関係について、実験と簡易モデルにより検討を行った。

2. 水理実験による検討 (1) 水面振動とフルード数の関係: 実験には長さ4m、幅25cm、水路床勾配1/300の開水路を用い、側岸に図1に示すような死水域を設けた。流量を一定とし、下流端水深を調節することによりフルード数を変化させ、図1の点Aにおける水面振動をサーボ式水位計により計測した。図2は実験における水面振動のr.m.s.の無次元量(平均水深で無次元化)とフルード数の関係を示したものである。Fr=0.75, 0.4付近で極小、Fr=0.65, 0.3付近で極大となっている。また、■はセイシュ(死水域中央に節を有する主流方向のセイシュ)の周期で振動している場合、●はセイシュの2倍の周期で振動している場合をそれぞれ示す。セイシュの2倍周期の発生は、渦列の不安定性によるものと思われる。ただし、Fr=0.6~0.7付近でのみセイシュの2倍周期の振動が発生する理由は不明である。

表1 水面振動特性に関する実験条件

Run	h-1	h-2	h-3	h-4	h-5	h-6	h-7	h-8	h-9	h-10	h-11
平均水深(cm)	4.26	3.47	3.03	2.64	2.34	2.02	1.89	1.81	1.73	1.69	1.62
フルード数	0.20	0.27	0.33	0.40	0.48	0.60	0.66	0.71	0.76	0.79	0.84

単位幅流量: 54.1(cm²/s), レイノルズ数: 4925, 水温: 16.5(°C), 水路床勾配: 1/300

(2) 交換速度とフルード数の関係: 水面振動は死水域・主流間の物質交換現象に関係すると考えられるため交換速度についても実験を行った。この実験では、細かい紙片を死水域内に均等にまき、上方からビデオ撮影を行い、紙片の数の時間的変化から交換速度を求めた。表2は交換速度に関する実験の条件である。図3はフルード数と無次元交換速度 $k' = k/u_0$ (u_0 : 主流平均流速)の関係を示す。極大、極小の位置は図2とほぼ一致しており、交換現象が水面振動と密接な関係にあることがわかる。ただし、図2と異なり、フルード数の小さい領域で交換速度が比較的大きな値を示している。これは、この領域ではセイシュや大規模渦の影響が小さく、死水域内循環流等の定常的な現象が交換現象を支配するためと考えられる。

表2 物質交換係数に関する実験条件

Run	k-1	k-2	k-3	k-4	k-5	k-6	k-7	k-8	k-9	k-10
平均水深(cm)	4.43	3.45	2.92	2.46	2.23	2.02	1.90	1.76	1.67	1.58
フルード数	0.18	0.26	0.34	0.43	0.50	0.59	0.64	0.72	0.78	0.84

単位幅流量: 52.4(cm²/s), レイノルズ数: 4775, 水温: 16.5(°C), 水路床勾配: 1/300

3. 簡易モデルによる検討 フルード数と水面振動の関係について、次に示す簡易モデル[1]により検討してみよう。まず、次の3つの仮定をおく。(1)大規模渦の進行速度は主流流速の0.5倍とする。(時間に関する安定解析結果に対応。)(2)大規模渦は主流方向に増幅しないとする。(3)セイシュは節を1つ有する主流方向の振動のみを考え、大規模渦の発生周期はセイシュの周期に一致するものとする。これらの仮定により、大規模渦の空間的な間隔(Λ)は、

$$\Lambda = U_0/2 \cdot T = L \cdot Fr \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 U_0 : 主流流速、 T : セイシュの周期、 Fr : フルード数である。次に、渦とともに移動する界面の横断方向の流速分布を次のように正弦曲線分布で近似する。

$$v(x) = \alpha U_0 \sin\{2\pi(x - X)/\Lambda\} \dots\dots\dots (2)$$

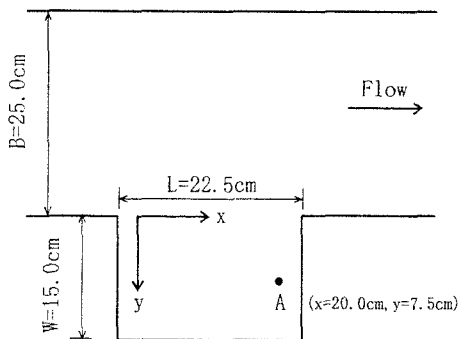


図1 対象とした死水域

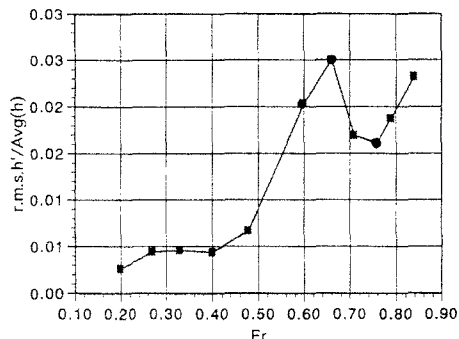


図2 Fr数と水面振動の関係

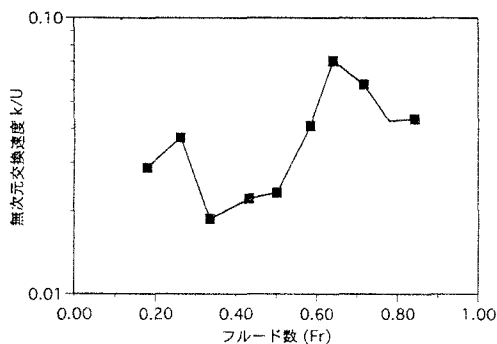


図3 Fr数と交換速度の関係

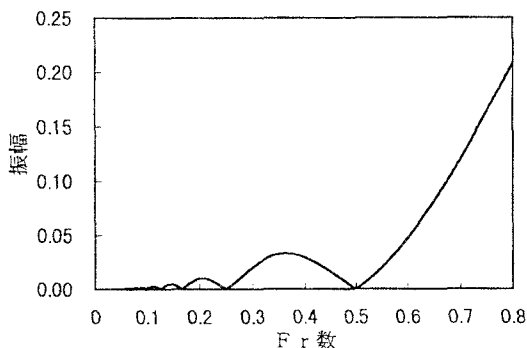


図4 簡易モデルによるFr数と水面振動の関係

ここに、 α : 振幅、 x : 空間座標 (死水域中央を原点とし、主流方向を正とした。)、 X : 渦の位置である。死水域下流側半分での界面横断流量 (瞬間流量) $q(t)$ を求めるため、以下のように積分を行う。

$$q(t) = h_0 \int_0^{L/2} v(x) dx \quad \dots \quad (3)$$

時間 $0 \sim t$ の流入量 $Q(t)$ は次式で表される。

$$Q(t) = \int_0^t q(t') dt' \quad \dots \quad (4)$$

水面振動量 $h(t)$ は $Q(t)$ を死水域半分の面積で割り、

$$h(t) = Q(t) / (WL/2) \quad \dots \quad (5)$$

となる。さらに、これを平均水深 h_0 で無次元化することにより次式が得られる。

$$h'(t) = \frac{2A}{\pi^2} \frac{L}{W} Fr^2 (1 + \beta Fr \Theta) \Theta \sin \left(\frac{2\pi t}{T} + \phi \right) \quad \dots \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta}, \quad \theta = \frac{\pi}{Fr}, \quad Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}}, \quad T = \frac{2L}{\sqrt{gh_0}}, \quad \Theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}}, \quad A, \beta : \text{const.}$$

上式では、渦とセイシュとの共鳴効果を考慮して、式(2)中の α を次式で表している。

$$\alpha = A(1 + \beta Fr \Theta) \quad \dots \quad (7)$$

図4は式(6)による、フルード数と水面振動の関係を示したものである。この図には図2にみられる $Fr=0.7$ 付近の凹凸がみられない。これは、簡易モデルではセイシュの2倍周期の発生を考慮していないためと考えられる。この点を除けば、本簡易モデルは図2の特性をほぼ再現していると考えられる。

4. おわりに 死水域における水面振動、物質交換現象とフルード数の関係について、実験と簡易モデルにより考察した。今後、他の水理パラメータ (例えばレイノルズ数) の影響についても検討したい。

参考文献 [1] 木村一郎・細田尚・村本嘉雄・安永良 : 水工学論文集, 第39巻, pp.779-784, 1995.