

国立公害研究所 正員 福島武彦

正員 村岡浩爾

1. はじめに

停滞水域の流動、混合現象には風による流れつまり吹送流の影響が大きい。このため流動は風の吹送形態に大きく支配されることになるが、吹送時間と流れが定常に達するのに必要とする時間の関係で非定常流動状態にある期間がかなり大きい割合を占めることも予想される。ここでは吹送流の実験を行ない、主に定常状態時の力学的エネルギー収支及び風の急激な吹送開始、停止に伴う流動の変化の様子を整理するとともに理論的検討を行った結果を報告する。

2. 実験方法

図1(高さ20cmの例)に示すような高さ10cm(A), 高さ20cm(B)の2個の木製本流を風洞中に設置し、6.63(I), 4.43(II), 3.13(III) m/sの3種の風速で実験を行った。風速はホットフィルム流速計、流速は水平二次超音波流速計、最高は抵抗線式水位計を用い、また表面流速はペンチクズ、液体粒子(比重1.0)が測定区間を通過する時間より測定した。流速は定常実験ではA本流で5点、B本流で24点程度、各測定点で計測し(2分以上, 50Hz), 非定常実験では各Runごとと $T=40, 180, 300$ cm, $y=0$ cm, A-3本流, B-4本流の位置で各2回ごと吹送開始, 停止の実験を行った。

各Runにおける風, 表面流速の特性を表1に示す通りである。ここで h は本流, W は風速, $u_{*s} = \sqrt{T_{wind}/\rho_a}$, $u_{*r} = \sqrt{T_{wind}/\rho}$, T_{wind} は風のせん断力, ρ_a, ρ は空

気, 水の密度, C_f は風摩擦係数, u_{sur} は本表面流速である。定常時の平均流速 $\bar{u}$, 乱れ速度 $\sqrt{u'^2}$, エネルギースペクトル, エネルギー逆散率 ε (エネルギースペクトルの $-5/3$ 乗域のレベルより算出)等の鉛直分布, 波の特性などもとめたが、ここでは省略する。境界面付近での混合長の減少とVan Driest型に補正した混合長モデルにより、これらの鉛直分布は比較的よく予測しうるという結果を得ている¹⁾。

3. 力学的エネルギー収支

得られた実験結果をもとに定常時のエネルギー収支をまとめると表2である。 E_u, E_w は主流(u)の平均流, 乱流成分の単位面積当りの運動エネルギー量である。(実験より $\bar{v}=0, \sqrt{v'^2}=\sqrt{u'^2} \rightarrow E_v \ll E_u, E_v \approx E_w$, 且 $\bar{w}=0, \sqrt{w'^2} \approx \sqrt{u'^2}$ である。)

$$E_u' = \frac{\rho}{2} \int_{-h}^0 \bar{u}^2 dz, \quad E_w' = \frac{\rho}{2} \int_{-h}^0 \bar{u}^2 dz \quad (1)$$

ここで $z=-h$ (図1), 且 E_u' には本表面付近での流速分布が大きく影響するため、測定点間の分布は対数則を仮定してとめた。 E_{wind} は風から本塊への単位時間当りのエネルギー供給量であり、 $E_{wind} = T_{wind} u_{sur}$ (2) よりとめた。次の E_{tur} は ε と全水

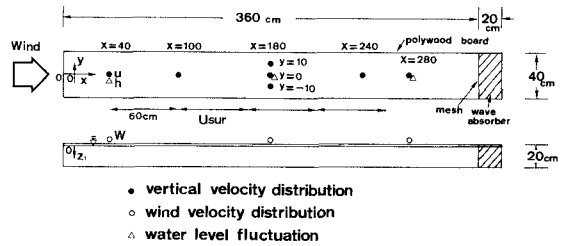


図1 測定地点と測定項目

表1 鉛直循環流実験 — 風の条件, 表面流速

Wind Type	h	u_{*s} (cm/s)	T_{wind} (dyne/cm ²)	u_{*r} (cm/s)	z_0 (cm)	$Re_\tau = \frac{u_{*s} z_0}{\nu_a}$	C_f	u_{sur} (cm/s)	u_{sur}/W (%)	u_{sur}/u_{*s}
I (6.67 m/s)	A (8.8 cm)	25.8	0.79	0.89	2.2	391	1.46×10^{-3}	19.7	3.0	0.76
	B (18.8 cm)	21.5	0.56	0.75	0.78	116	1.04×10^{-3}	18.8	2.8	0.87
II (4.43 m/s)	A	13.9	0.23	0.48	0.17	16.3	1.03×10^{-3}	11.5	2.7	0.83
	B	10.4	0.13	0.36	0.059	4.2	5.77×10^{-4}	12.6	2.9	1.21
III (3.13 m/s)	A	10.5	0.13	0.37	0.64	46.3	1.12×10^{-3}	10.2	3.3	0.97
	B	7.3	0.064	0.25	0.063	3.1	5.40×10^{-4}	8.8	2.8	1.21

表2 力学的エネルギー収支

Wind Type	h (cm)	E_u'	E_w'	E_{wind}	E_{tur}	E_{dis}	E_{disb}	E_{ss}	E_{total}
		(g/s ²)			(g/s ²)				
6.67	8.8	93.7	15.9	15.2	2.29	8.54	0.265	2.67	13.8
	18.8	134.2	22.5	10.7	1.55	4.94	0.153	0.90	7.54
4.43	8.8	39.0	5.4	2.65	0.419	1.34	0.042	0.28	2.08
	18.8	75.2	7.3	1.52	0.337	0.56	0.017	0.19	1.10
3.13	8.8	32.0	0.5	1.25	0.0082	0.58	0.018	0.019	0.63
	18.8	43.6	2.8	0.50	0.032	0.19	0.006	0.042	0.27

深にわたり積分して算定した乱流運動量である。\$E_{difs}\$, \$E_{dirb}\$ は本表面、底面付近での平均流速の勾配により生じる通流運動量であるが、実験結果よりもとまらないため、(\$E_{wind}\$, \$E_{tur}\$, \$E_{difs}\$, \$E_{dirb}\$, \$E_{we}\$ は単位時間面積の量)

$$E_{difs} = \rho \int_{-\delta_w}^0 u \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2 dz, \quad E_{dirb} = \rho \int_{-h}^{-h+\delta_b} u \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)^2 dz \quad (3)$$

において、粘性底層 (\$-\delta_w < z < 0\$, \$-h < z < -h+\delta_b\$) で \$d\bar{u}/dz = u_*'^2/\nu\$, \$\delta = R_{ex}\nu/u_*'\$, \$R_{ex} = 11.6\$ と仮定して計算した¹⁾。ここで \$u_*'\$ はその面での摩擦速度、\$\nu\$ は動粘性係数である。また波による運動量は \$E_{we} = \frac{1}{4} \rho g A_0^2(l) C_0/l\$ (4) よりもとめた。\$g\$ は重力加速度、\$A_0\$ 波の振幅、\$C_0\$ 位相速度、\$l\$ 本路長である。また \$E_{total} = E_{tur} + E_{difs} + E_{dirb} + E_{we}\$ である。

この表より \$E_{wind}\$ と \$E_{total}\$ がほぼ釣り合っていること、\$E_{total}\$ の中では \$E_{difs}\$ が最も大きく、\$E_{tur}\$ は \$E_{total}\$ の 5~15% であること等がわかる。現地観測における \$E\$ の \$E_{wind}\$ に対する比率は数%程度であり¹⁾、よく一致している。\$E_{dir}\$ の大きいことは平板に沿う境界層中の流れに対する報告²⁾と等しい。現地においては風速、吹送距離の増大とともに \$E_{we}\$ の比率が増加することが予想される。

4. 非定常流動特性

図2に風の吹送開始、停止に伴う \$\bar{u}\$, \$\sqrt{u'^2}\$ の変化の様子を示す (I-B, \$Z=180\$ cm, \$Z_1=1\$ cm の例)。\$\bar{u}\$, \$\sqrt{u'^2}\$ の算定時間を 2 秒として、吹送開始後に流平均値 \$u_{sat}\$ の \$(1-1/e)\$ の値に達するのに必要とする時間 \$T_{1/e}\$ と、停止後は \$u_{sat}\$ の \$1/e\$ になる時間 \$T_{1/e}\$ を定義し、実験よりもとめた。ここで単位面積の水塊でのエネルギー保存式を考えた。\$F = \frac{1}{2h} \int_0^h (\bar{u}^2 + u'^2) dz\$ (\$=(E_{wind} - E_{dir})/\rho h\$) として表より \$F\$ と \$E_{wind}/\rho\$ の関係を表わしたものが図3である。\$\bar{u}\$, \$\sqrt{u'^2}\$ が \$u_* f(z/h)\$ の形に無次元化しうると

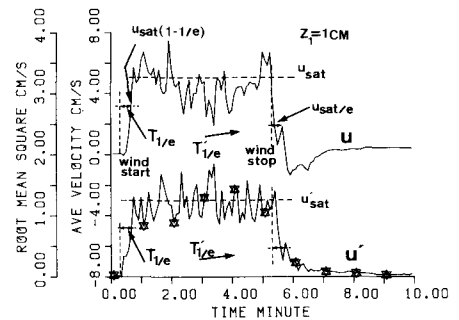


図2 風の吹送開始、停止による \$\bar{u}\$, \$\sqrt{u'^2}\$ の変化

\$F\$ (cm\$^2\$/s\$^2\$)

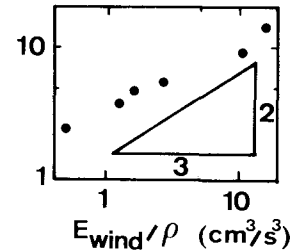


図3 \$E_{wind}/\rho\$ と \$F\$ の関係

表3 \$T_{1/e}\$, \$T'_{1/e}\$, \$T_c\$ の値

sec	I-A	II-A	III-A	I-B	II-B	III-B
\$T_{1/e}\$						
\$\bar{u}\$	13.9	20.1	19.1	29.9	53.3	42.7
\$u'\$	7.8	16.2	18.3	19.0	26.1	24.0
\$T'_{1/e}\$						
\$\bar{u}\$	15.8	12.7	14.3	11.9	14.0	12.3
\$u'\$	15.1	20.5	24.3	17.3	16.8	24.8
\$T_c\$	8.3	18.8	26.4	16.7	59.1	98.4

$$\rho h dF/dt = E_{wind} - \rho \gamma F^2 \quad (5) \quad (\gamma: \text{定数})$$

と書くことができる。吹送開始、停止の条件から

(1) 吹送開始

近似解として

$$F(t) = (E_{wind}/\rho \gamma) (1 - e^{-\gamma t})^2 \quad (6)$$

$$\bar{u}(t) = F^{1/2} = (E_{wind}/\rho \gamma)^{1/2} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (6')$$

$$\text{ここで } \gamma = 3\gamma^{1/2} E_{wind}^{1/2} / 2h \rho^{1/2}$$

$$T_{1/e} = 2\rho h F_{sat} / 3E_{wind} \quad (7)$$

(2) 吹送停止

$$F(t) = 1/(1/\sqrt{F_{sat}} + \gamma t/2h)^2 \quad (8)$$

$$\bar{u}(t) = F^{1/2} = 1/(1/\sqrt{F_{sat}} + \gamma t/2h) \quad (8')$$

$$T_{1/e} = 2(E-1)\rho h F_{sat} / E_{wind} \quad (9)$$

が得られる。ここで \$F_{sat}\$ は定常時の \$F\$ の値である。(6), (9) と同様の関係は運動量保存式よりも導ける。表3には各 Run ごとに \$\bar{u}\$, \$\sqrt{u'^2}\$ に対する \$T_{1/e}\$, \$T'_{1/e}\$ の平均値と \$T_c (= \rho h F_{sat} / E_{wind})\$ の値を示す。この表より \$T_c\$ が \$T_{1/e}\$, \$T'_{1/e}\$ の推定がある程度可能であることがわかる。(\$\sqrt{u'^2}\$ もほぼ同程度の \$T_{1/e}\$, \$T'_{1/e}\$)

5. おわりに

実験から吹送流の定常状態時におけるエネルギー収支及び非定常状態の時間スケールの予測方法を明らかにした。現地においては風浪、長浪的流動等の因子が大きな影響をもつため、今後こうした点を念めて詳細な検討を行ないたい。

【参考文献】

1) 村岡浩爾・梅島成茂：霞ヶ浦(西浦)の湖流，国土公署研究所報告 第19号 (1981)

2) J.C. Dyer: 湖流，岩波書店 (1975)