

河川の流に於ける變動速度について

正員 永井 莊七郎*

要旨 自然河川、人工水路等に於ける渦亂流に就て、變動速度の大きさ、その分布等を測定し、之等の結果を流體力學の理論と比較検討すると共に、自然河川、人工水路等に於て流速を流速計によつて測定する際に、1 點に於ける所要測定時間を決定した。

1. 理論的考案

(1) 渦流に於ける變動速度

一般に渦亂流に於ては水分子は複雑なる渦運動をなすと同時に上下左右の層の間に激しい混合運動をなしてゐる。この渦亂運動のために水流中の 1 點に於ける流速は時々刻々に變化してゐる。今 2 次元的な流れを考へ、主流(平均流)の方向に x 軸を、之に鉛直上向に z 軸をとる。主流の速度を v_x とすれば、等速流に於ては v_x は z 方向のみに變化し、

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \bar{v}_x + v'_x, & \bar{v}_z &= 0 \\ v_z &= v'_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。茲に \bar{v}_x, \bar{v}_z は或る時間 T に於ける平均流にして、 v'_x, v'_z は各瞬間に於ける變動速度である。

水流中の 1 點の或る瞬間に於ける流速は v_x にして、 v_x 中の v'_x が時々刻々變化するために v_x が各瞬間に於て異つた値をとるのである。而して v'_x と v'_z とは無關係ではなく或る相關性を有してゐると考へられ、又兩者共に或る適當に長い時間 T に就て平均すれば零である。即ち

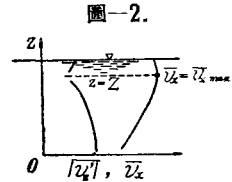
$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} v'_x dt &= v'_x = 0, \\ \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} v'_z dt &= v'_z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。(2)式中の T が河川や人工水路内の流れ(渦亂流)に於て最小限度何秒位であるだらうか。之が今回の實測に於ける目的の一つであつた。

扱て v'_z の鉛直方向に於ける分布を考ふるに、渦亂運動を單に混合運動のみであると假定すれば(實際には渦運動があつて極めて複雑なのであるが)、次式で表はされる。

$$\overline{v'_z} = \sqrt{|Z-z|} \bar{v}' \quad (3)$$

式中 Z は $\bar{v}_x = \bar{v}_{x,max}$ なる點である。(永井著、「流砂に關する研究(第 2 編)(砂粒の浮游理論)」土木學會誌、昭 18, 9, 参照)



(3) 式によれば、 $\overline{v'_z}$ は $z=Z$ なる點を境として之より遠ざかるにつれて拋物線的に増大する。但し $z=0$ 附近即ち床面の極く近くの境界層内に於ては底面に近くなるにつれて逆に減少して行くと思へられる。

$\overline{v'_z}$ の値は著者が床面に微細なる砂を敷いた水路(幅 55 cm)に於ける實驗結果より求めたるに、 $\bar{v}_x = 23.2 \sim 47.8$ cm/sec なる時、 $\overline{v'_z} = 0.80 \sim 3.02$ cm/sec にして、 $\overline{v'_z} / \bar{v}_x$ は 2.0~10.7% であつた。 v'_z は v'_x を異にする水の小塊が混合する z 軸方向の速度であるから、恐らくは v'_x より稍、小なる値であるだらうと考へられる。従つて $\overline{v'_z} / \bar{v}_x$ は $\overline{v'_x} / \bar{v}_x$ よりは稍大きく、大體 10 數% 以下であるだらうと考へられる。このことは、後に記する如く、著者が自然河川及び人工水路に於て行つた實測結果によつて確めることが出来た。

次に v'_z の鉛直分布に就ては一應次式で表はされてゐる。

$$\overline{v'_z} = l \left| \frac{dv'_z}{dz} \right| \quad (4)$$

この式も(3)式を誘導したる場合と同様、渦亂流を簡單に混合運動のみと假定したものである。

今 v'_z が一應(4)式で表はし得るものとすれば、(4)式中の l は水の各層間で運動量が輸送される距離にして、混合距離 l に相當近い値であらうと想像されてゐる。しかし l の分布に關しては今のところ知られてゐない。今假に $l = l$ とすると

* 運輸省第三港灣建設部調査課長

$$|\overline{v'_x}| = l \left| \frac{dv_x}{dz} \right| \dots\dots\dots (5)$$

より、

$$|\overline{v'_x}| = k_1 l \left| \frac{dv_x}{dz} \right| \dots\dots\dots (6)$$

なる $|\overline{v'_x}|$ と同じ分布をなすことになる。しかし v'_x が v_x と同じ鉛直分布をなすことについては疑問があつたので、實測によつて(3)式の適否を確かめてみたいと考へたのである。

(2) 渦亂流に於ける T の値

我々が流速計又はピトー管で測定しうる流速は嚴密には $\sqrt{(v_x)^2}$ である。それ故、流速計又はピトー管で丁度、渦亂流に於ける(2)式中の T 時間の流速を測れば

$$(\overline{v_x})^2 = (\overline{v_x + v'_x})^2 = v_x^2 + (\overline{v'_x})^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$\therefore \sqrt{(\overline{v_x})^2} = v_x \sqrt{1 + \frac{(\overline{v'_x})^2}{v_x^2}}$$

$(\overline{v'_x})^2/v_x^2$ は 1 に比して非常に小さいから

$$\sqrt{v_x^2} = v_x \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{(\overline{v'_x})^2}{v_x^2} \right) \right] \dots\dots\dots (8)$$

v'_x/v_x は大きくとも 20 數%前後で、一般には數%以下であるから、(8)式の右邊第 2 項は大體 2% 以下となるを以て

$$\sqrt{v_x^2} \doteq v_x \dots\dots\dots (9)$$

と書いて差支ないのである。即ち流速計で渦亂流の流速を測定する際に、丁度 T 時間の平均流速を測れば、測定流速はその點の平均流速であるといつて差支ないのである。

然るに若し T よりも短い時間の流速を測つたとすれば、 $v'_x \neq 0$ であるから、

$$\sqrt{(\overline{v_x})^2} = v_x \left[1 + \left(\frac{v'_x}{v_x} \right)^2 + 2 \left(\frac{v'_x}{v_x} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

即ちこの場合の實測流速はその點の平均流速 v_x とは異つて来る。それ故、流速計又はピトー管で渦亂流の流速を測定せんとする際には、 T なる時間を知ることが大切である。

2. 實 測

(1) 實 測 方 法

渦亂中の或る 1 點に於ける各瞬間の速度 v_x を刻々測定することは相當面倒にして、特定の器械

をつくる必要がある。しかし實測せんとした當時(昭 19 年、舊京城帝大在職)は戦争の最中で思ふ通りの資料は入手出来ず、正確な方法ではないが、先づ手近にある器械を利用して出来る限り短時間の流速を測るといふ姑息な方法を選ぶより仕方がなかつた。即ち廣井式流速計(10 回轉に 1 番)を用ひて、各 10 回轉或は 20 回轉毎の秒數を stop watch により次々に讀取るのである。

この方法により、2~8 秒間毎の平均流速を次々に測り、1 點に於て 3 分乃至 8 分間位(800 回轉乃至 2400 回轉)測つて、速度の變動狀況及び渦亂運動に於ける T 時間を調べた。

(2) 實 測 結 果

1. 河川に於ける測定 朝鮮の北漢江上流に於て、昭 19. 3. 1. に測定した結果を、累加平均流速を縦軸に、時間及び回轉數を横軸にとつて圖示すれば圖—3(a)にして、各 10 回轉毎の流速を縦軸にとれば圖—3(b)の如くである。(水面下 0.05 m にて測定せるもののみを掲げる)

この地點は淺瀬の上流數 10 m で、水面には可なりの波あり、渦亂も相當強く、又河床は玉石である。

又上記地點より上流約 200 m の地點で 5 月 12 日測定した結果は 圖—4 の如くである。この地點は水面勾配も前記地點より緩かにして略 $I=1/2000$ 、渦亂も遙かに少く、又河床は細い砂に玉石が多數混じてゐる。

圖—3,4 の結果を見れば、圖—3(a)(水面下 0.05 m)に於ては $T=40$ 秒、同(b)に於ては速度の變動は可

圖—3.

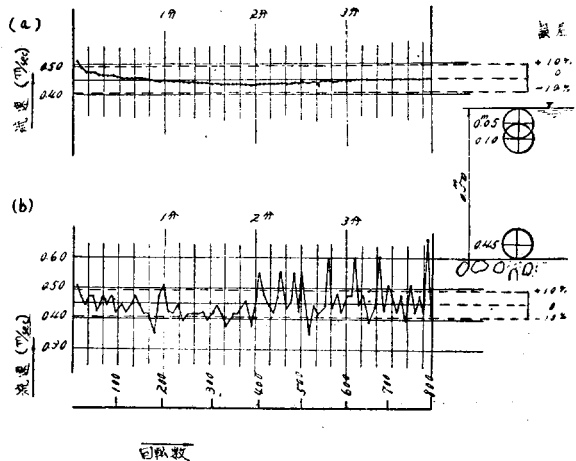
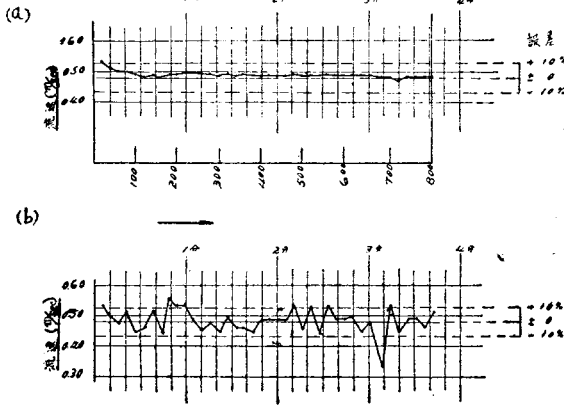


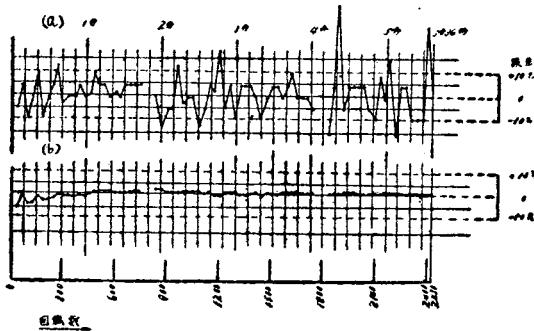
圖-4.



なり大きい。800 回轉, 236.4 秒間の平均流速 v_x に對する速度の變動, 即ち v'_x/v_x が $\pm 10\%$ 及びそれ以上のものの數 $N=20$ 個である。水面下 0.10 m に於ては $T=90$ 秒で非常に大きく, $N=28$ 個である。即ち T 及び N 共に水面下 0.05 m のものより大きい。水底上 0.05 m に於ては T 及び $|v'_x|$ は 3 點中で最も小さく, $T=30$ 秒~50 秒, $N=22$ 個。圖-4 (水面下 0.05 m) では $T=40$ 秒, $N=9$ 個, 水面下 0.2 m では $T=35$ 秒, $N=1$ 個, 水面下 0.1 m では $T=20$ 秒, $N=5$ 個である。以上 5 月 12 日の測定結果では, 變動速度 $|v'_x|$ は鉛直線上の最大流速點である水面下 0.2 m で最小である。又 5 月 12 日の結果を 3 月 1 日の結果と比較するに, 前者は $|v'_x|$ 及び N 共に後者よりも遙かに小さい。之は 5 月 12 日に測定した地點は 3 月 1 日に測定した地點よりも水深大きく, 勾配緩かにして且渦亂の程度が遙かに小さかつたためであると考へられる。

2. 灌溉水路に於ける測定 灌溉用貯水池に連絡す

圖-5.



幹線水路 (朝鮮, 論山水利組合所有) (數幅 6m の Concrete 梯形開水路側壁勾配 1: 1.5) に於て, 昭 19. 6. 20. に測定した結果は圖-5 である。(水面下 0.05m にて測定せるもののみを掲げる)

圖-5 (水面下 0.05m) を見るに, $T=40\sim 60$ 秒, v'_x/v_x が $\pm 10\%$, 圖は略したがそれ以外の深さのもの數 $N=11$ 個にして, T 及び N は比較的小さいが, $|v'_x|$ はそれ以外の何れの場合よりも大である。水面下 0.20m に於ては, $T=50$ 秒, $N=12$ 個であるが, $|v'_x|$ は他の諸點に比して最も小さい。水面下 0.40m では, $T=50$ 秒, $N=21$ 個。水面下 0.60m では, $T=75$ 秒, $N=18$ 個。水底に近い所では, $T=20\sim 50$ 秒, $N=17$ 個にして, T は非常に小さく, 變動速度 $|v'_x|$ も又水面下 0.20 m に次いで小さい。

次に同一水路の同一斷面に於て, 水深を 1.00 m にして測定した結果を圖示すれば 圖-6 の如くである。

圖-6 (水面下 0.05 m) では T は極めて大きく, $N=22$ 個, 又 $|v'_x|$ も大である。圖は略したが最大流速點である水面下 0.20 m では $T=50\sim 60$ 秒, $N=20$ 個にして前者より小さく, $|v'_x|$ も又小さい。

同一箇所水深を 0.45 m に減じて測定した結果は圖-7 である。圖-7 (水面下 0.05 m) では $T=30$ 秒, $N=12$ 個, 圖は略したが水面下 0.10 m では $T=50$ 秒, $N=6$ 個にして, $|v'_x|$ は後者が稍々小であり, 水底附近では $T=35$ 秒, $N=4$ 個にして, 前 2 者に比して T 及び N 共に小さく, 且 $|v'_x|$ も最も小さい。

3. 在來の考へ方の實測結果による検討

(1) 實測と理論との比較検討

2. に記したる河川及びコンクリート開水路に於ける實測結果を總括すれば次表の如くである。

之等の實測結果より次のことがいへる。

1. 渦亂運動に於ける T は概して流速が大なる程大である如くであるが, 他の原因によつて大きく變動するので, 流速のみでは大小はきまらぬ。然し平均流速 $v_x=0.30\sim 1.00$ m/sec 位の範圍に於ては $T=20\sim 90$ 秒位にして, 平均して大體 60 秒と考ふれば大差がない。
2. 同一鉛直線上に於ては, 變動速度の大小 $|v'_x|$ は

圖-6.

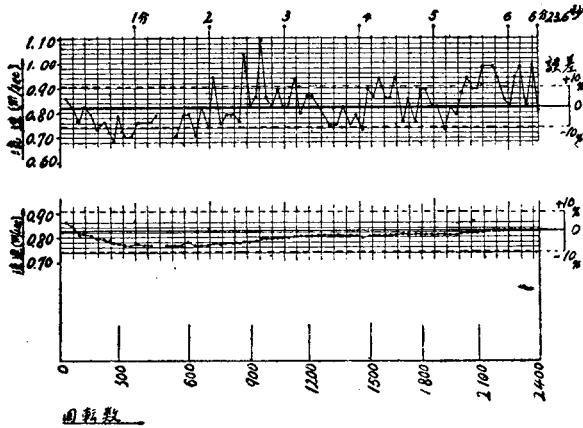
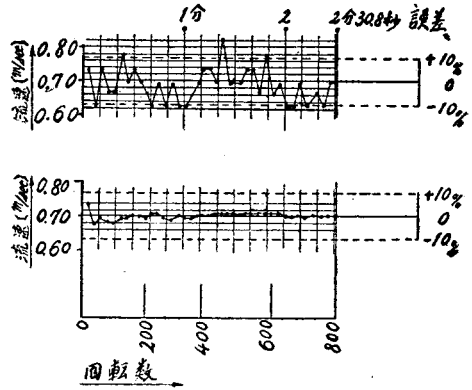


圖-7.



實測結果の總括

測定場所	河川 (北漢江)					
測定月日	3月1日			5月12日		
水深 (m)	0.50			0.71		
測定水深 (m)	0.05	0.10	0.45	0.05	0.20	0.61
流速 (m/sec)	0.446	0.448	0.394	0.480	0.502	0.354
$ v'_x /v_x$ が $\pm 10\%$ 以上の数	20個	28個	22個	9個	1個	5個
$ v'_x $ の最大, 最小の點	最大		最小	最大	最小	
(2) 式中の T (秒)	40	90	30~50	40	35	20

コンクリート開水路 (論山灌漑水路)

6月20日					6月20日		6月21日		
0.83					1.00		0.45		
0.05	0.20	0.40	0.60	0.78	0.05	0.20	0.05	0.10	0.40
0.953	0.917	0.897	0.802	0.649	0.825	0.481	0.700	0.692	0.525
11個	12個	21個	18個	17個	22個	20個	12個	6個	4個
最大	最小				最大		最大		最小
40~60	50	50	75	50	極めて大	50~60	30	50	35

水面に於て最大にして、最大流速點附近或は水底附近に於て最小である。

3. 同一鉛直線上に於ては、 T は一般に水底に於て最小である。

4. 或る一點に於ける平均流速 v_x に對する変動速度の大きさ $|v'_x|$ の比、即ち $|v'_x|/v_x$ は v_x の大小よりは寧ろ渦亂の程度による如くである。

1. (1)に於て記した如く、流體力學の理論に於ては

變動速度 $|\overline{v_x}|$ は(1)式で表はされてゐる。而して同式中の l に就ては今のところ明かではないが、混合距離 l に相當近いものと想像されてゐる。従つて $|\overline{v_x}|$ の分布も略 $|\overline{v_z}|$ の分布に近いであらうと考へられるのであるが、今回の測定結果(粗雑な測定ではあるが)から $|\overline{v_x}|$ は理論式から推論された如く、 $|\overline{v_z}|$ と略類似した分布をなしてゐることが知られた。又 $|\overline{v_z}|$ は底面近くの境界層内では減少するであらうと考へたのであるが、 $|\overline{v_x}|$ も又底面附近で減少してゐることが知られた。

コンクリート開水路及び河床に玉石の多い河川に於ても、水底附近にて速度の變動及び T が小さいことは興味深いことにして、境界層の存在を裏書するものと考へられる。

(2) T に就ての在來の考へ方に對する批判

河川或は水路の流量を流速計によつて測定する場合に、1 點に於ける觀測を何秒間或は何回轉にすべきであるかといふことが問題になるのであるが、1.(2)で記した如く、渦亂運動に於ける T_{min} (最小) 秒にとればよいのである。然しこの觀測時間に就ては從來一定した考へがなかつたやうで、官廳の流量測量心得等の規定もまちまちであつた。例へば、舊朝鮮總督府土木課の河川測量心得(昭 12. 3. 發行)第 3 編第 4 章第 134 條には、「1 點に於ける流速計の測定時間は 60 秒以上若しくはその回轉數 40 回以上たることを要す」とあり、舊滿洲鐵道交通部水路司の河川調査要領心得集編第 6 編に、「觀測はなるべく時間をかけ回轉數を多く求めるは望ましいが、そのために多くの時間を要して水位に甚しい變化を來すことのないやうにすべきである」とある。又福田次吉氏著「河川工學」(昭 8) 143 頁には、「一測定に要する回轉の多きを希望すれども、一組に要する時間が長くなる時はその間に水位の變化する虞もあるから、大體 20 回轉餘に要する時間を stop-watch で秒以下 1 位迄測ればよい」と記されてゐる。

周知の如く、流速計の回轉數は種類により異り、廣井式の如き早いものもあれば Price 式の如き遅いものもあるから、一點に於ける測定時間を流速計の回轉數で規定せんとする場合は各流速計の種類によつて區別しなければならぬ。それ故、調査心得等に於て一律に規定せんとする場合は何秒位と秒數で定むるのが望ましいと考へられる。さて上記心得中で舊朝鮮總督府土木課の測量心得は 60 秒以上と記してあるから、流速

が $v_x \approx 0.30 \sim 1.00 \text{ m/sec}$ 位の範圍の場合には最も適當な規定である。普通に流量測量で最も多く流速計を使用する場合は流速が $v_x \approx 0.30 \sim 1.50 \text{ m/sec}$ の範圍であるから、1 點に於ける測定時間は大體 60 秒位が適當である。福田次吉氏は大體 20 回轉餘と記してをられるが、之は回轉數が少い Price 式に對しても過小にして、廣井式、森式等に對しては甚だしく過少である。

(3) 結 言

本測定により得られた結果を要約すれば次の如くである。

1. 渦亂流に於て、主流 v_x 方向の變動速度 $|\overline{v_x}|$ の分布は之に直角なる方向の變動速度 $|\overline{v_z}|$ の分布と略類似してゐる。従つて(4)式中の l は混合距離 l と略同じ分布をなすものであるとの從來の考へ方は正しいやうである。
2. $|\overline{v_x}|$ 及び $|\overline{v_z}|$ は共に、同一鉛直線上に於ては最大流速點附近と水底附近で小さくなる。(3)式は水底附近の境界層内では成立たない。
3. 渦亂運動に於ける T ((2)式中の)は、水面に於て一般に最も大きく、水底に於て最も小さい。(2)及び(3)の結果より、人工水路や自然の河川に於ても水底には境界層が存在している、この層内の水分子の運動狀況は層外の狀況と全く相違してゐると考へられる。
4. T は流速の大きさのみならず渦亂の程度その他によつても變化するが、平均の流速 $v_x \approx 0.30 \sim 1.00 \text{ m/sec}$ 位の範圍に於ては大體 60 秒と考ふればよい。従つて流速計によつてこの範圍の流速を測定する場合には 1 點に於ける測定時間は大體 60 秒を要する。

本實測資料は昭 18 及 19 に朝鮮の河川及び人工水路に於て得た資料を整理したもので、當時は戦争の最中であつたため、思ふ通りに實驗器械を作製することが出来ず止むを得ず、手近な流速計(廣井式)を使用して實測を行ふの外なかつた次第である。時々刻々變動する速度の狀況等を電氣的に Oscillograph に記録させる方法を目下考究中であつて、渦亂流に關する未知の問題を更に究明したいと考へてゐる。尙本實測に關する費用の大半は舊朝鮮總督府土木課長山岡敏介氏(現岡山市復興局長)の御援助によつたものである。茲に深甚なる感謝の意を表する。

(昭 23. 2. 25. 受付)