

熱線流速計の非定常的検定法について

北見工業大学工学部 正員 佐藤 幸雄

I. まえがき

本研究で使用した熱線流速計と同種のもは現在数多くの人により使用され、それぞれ工夫された検定装置により、その性能、機器の性質などが調べられ、また、実際の流速測定法等についても研究されて来た。その場合、いづれも測定上の問題点としては、プローブの劣化、水の汚れの程度ならびに水温等の微細な変化に対しても出力電圧が変化することが難点となっていることが述べられている。加藤³⁾は円型の小型水槽を用いて行った研究より、水温変化が5~6°Cであっても、設定抵抗比の調整により、電圧変化を調整することが可能であると云う実用上貴重な結果を得ている。しかし、その他、汚れた水を使用して流速測定を行った Richardson & McQuivey²⁾の場合でもその手順が複雑であり、また、最近の河村等²⁾の研究では、やはり、きれいな水、温度変化のない状態で測定を行ない、水の汚れ、気泡発生等の影響がある場合はその解決がむづかしいことが指摘されている。いづれにしても、機器類にはそれぞれ特性があり、その特性をある程度詳細に把握しておく必要がある。本研究では上記のような、水の汚れ、温度変化に対する補正の問題にまで及らなかつたが、比較的きれいな水を使用し、水温変化が僅かな状態で、流速が非定常的に変化する場合の発生電圧の追従性、ならびにリニア化の問題に先ず着目し、新旧2種のプローブと使用した種々調べた結果を以下に報告するものである。

II. 検定装置ならびにプローブの移動速度

図-1のように円盤を用いた造波機に類似した装置を造波水槽上に設置し、円盤の材質は、回転ムラが現われないよう極力軽量にするためアルミ製とした。(円盤の直径84cm,重量約30g)

この円盤にロッド(軽合金パイプ)を取り付け、途中にガイド車を入れ、小型トロックと連結構により固定した。トロック中央には流速計を取り付けてある。モートルは小型ギヤモートル(回転

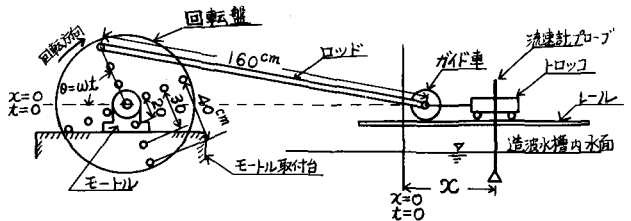


図-1 検定装置

数15r.p.m.)を使用した。この場合の円盤の回転周期は $T=3.882\text{sec}$ である。また、円盤上には中心より20, 30, 40cmの距離に孔をあけ、ロッド取付け位置を変えることにより、振巾ならびに速度を変えられるようにした。このような検定装置によりトロックを運動させると、図-1のように時間 $t=0$ のときの流速計位置 $x=0$ とすると、時間 t と流速計の移動距離(変位) x 、移動速度(流速) U 、との間には次式が成立つ。

$$\begin{aligned} \text{変位;} \quad x &= (a-l) - a \cos \theta + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \theta} \\ &= (a-l) - a \cos \omega t + \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \omega t} \quad \dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 θ : 変角、 ω : 角速度(rad/sec)、 a : 振巾
 l : ロッドの長さ、 $\theta = \omega t = \frac{2\pi}{T}t$ (T : 周期)

$$\text{流速;} \quad dx/dt = U = \omega a \sin \omega t - \frac{\omega a^2 \sin \omega t \cos \omega t}{\sqrt{l^2 - (a \sin \omega t)^2}} \quad \dots\dots (2)$$

(2)式より $t=0, T/2, T$ で $U=0$ であり、また、最大流

速 $U_{\max}$ と与える時間 t_m は、

$$\begin{aligned} d^2x/dt^2 &= dU/dt = \left[(\omega^2 a \cos \omega t) (l^2 - a^2 \sin^2 \omega t) \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \omega t} \right. \\ &\quad \left. - \omega^2 a^2 (l^2 - 2l^2 \sin^2 \omega t + a^2 \sin^4 \omega t) \right] / \left[(l^2 - a^2 \sin^2 \omega t) \cdot \sqrt{l^2 - a^2 \sin^2 \omega t} \right] = 0 \quad \text{より、} \end{aligned}$$

$$(a/l)^4 \sin^6 \omega t - (a/l)^2 \sin^4 \omega t - \sin^2 \omega t + 1 = 0$$

すに、 $(a/l)^4 \sin^6 \omega t$ を他項に比べて小さいと見做し、 t について解くと、

$$t_m = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{\pm \sqrt{-1 \pm \sqrt{1 + 4(a/l)^2}}}{\sqrt{2}(a/l)} \right\} \quad \dots\dots (3)$$

と得る。

また、(3)式の t_{H1} の値のうち、 $0 < t < T$ の間で U_{max} を与える所要の値は、

$$t_{H1} = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \left\{ \frac{\pm \sqrt{-1 + \sqrt{1 + 4(\alpha/l)^2}}}{\sqrt{2}(\alpha/l)} \right\} + \frac{T}{2} \quad \text{---(4)}$$

(1), (2)式を用いて、時間 t の変化に対する変位 x 、流速 U の計算値を図-2に実線で示した。図中の○印は変位の測定値のうち数個を描いたものである。測定値は16mmメカメラで流速計の動きとタイマーを撮影し、そのフィルムより各時間毎の変位を読み取った。

変位については計算値と測定値がよく一致し、円盤の回転ムラによる変位の中がみは現れていないと云える。したがって、流速値 U については各時間毎の計算値を用いることにした。また、図の流速値の発生状態を見ると $0 < t < T/2$ においては、 $0 \sim M$ 区間の速度勾配が $M \sim N$ 区間より小さい値を示しているのが特徴である。表-1 には円盤の回転半径 $\alpha = 40, 30, 20\text{cm}$ の場合の各々について、最大流速 U_{max} の値とその時間を(2),(4)式で計算し示した。

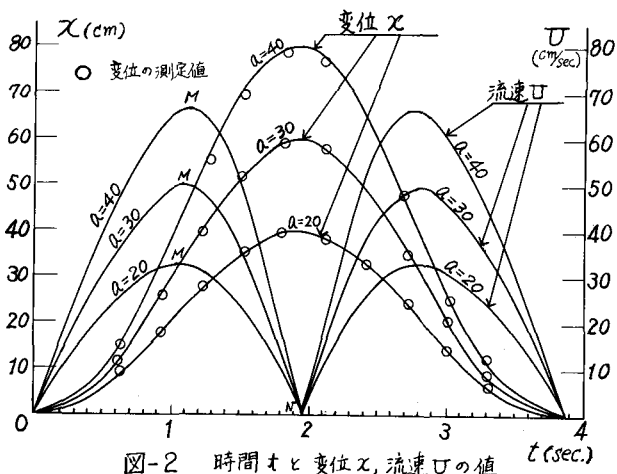


図-2 時間 t と変位 x 、流速 U の値

α cm	U_{max} 値	t_{H1} sec	t_{H2} sec
40	66.57	1.18	2.77
30	49.40	1.08	2.80
20	32.46	1.05	2.84

周期 $T = 3.882 \text{ sec}$, ロッド長さ $l = 160 \text{ cm}$

表-1 U_{max} の値とその時間

III. 熱線流速計の検定

熱線流速計は日本科学工業製 21 ser. を使用し、コントロールユニット (21-1312)、シグナルインジケータ (21-1211)、リ=アライザユニット (21-1711, 2楽器のみ) の組合せである。検出部は円筒形プローブ (1210-60 W) で、種類は1年位使用した古いもの1本 (旧プローブ) と新品1本 (新プローブ) の計2種を使用した。

i) ノン・リ=アの場合

つぎに、測定機器の原理は King の式が成り立つようなものとされている。すなわち、ノンリ=ア出力電圧 V と流速 U の関係は同一プローブで、熱線の設定抵抗 R と表面温度 T_f ならびに水温 T_a が一定のときは、

$$V^2 = V_0^2 + K\sqrt{U} \quad \text{---(5)}$$

が成り立つ。ここに V_0 は流速 $U=0$ のときのノンリ=ア出力電圧で、 K とともに次のように表わされている。

$$\left. \begin{aligned} V_0^2 &= A(T_f - T_a) \cdot R \\ K &= B(T_f - T_a) \cdot R \end{aligned} \right\} \quad \text{---(6)}$$

A, B は流体の性質により決まる定数とされているから、したがって、同一流体では V_0, K は定数となり、

また、(5)式を変形し

$$\sqrt{V^2/V_0^2} - 1 = (K/V_0^2)\sqrt{U} \quad \text{---(7)}$$

についてみると、 $K/V_0^2 = B/A = C$ の恒は、同一流体で

あれば、設定抵抗 R が変化し、それに伴って T_f が変わっても、あるいは、水温 T_a の変化によっても無関係な値となっている。これらの点について実際にノンリ=アの測定を行って調べると、測定は表-2 に示すように円盤の回転半径 $\alpha = 40\text{cm}$ の場合で設定抵抗比 $\gamma (=R/R_0, R_0$: 冷抵抗) の値は旧プローブについては1.020, 1.025, 1.030, 新プローブでは1.020, 1.025で行ない、ノンリ=アのおか電圧はデーターレコーダーを通りペンオットグラフに記録したが、その記録より $0 \sim M$ 区間 ($0 < t < t_{H1}$)

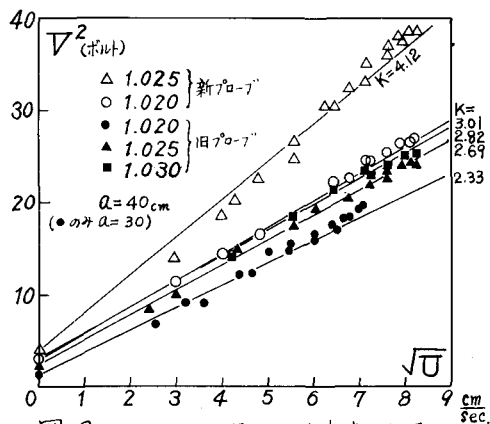


図-3 ノン・リ=ア出力電圧と流速値の関係

における各時間毎のノンリニア出力電圧を読み取りその同じ時間のプローブ速度(流速値)と対応させながら図に示すと $V^2 - \sqrt{U}$ の関係では図-3のようになる。測定値にはかなりのバラツキが見られるが、これはトロコの振動、プローブによる水の擾乱等の影響が記録を乱すためと流速値の変化にともなうノンリニア出力電圧の変化が小さいことにより記録からの読み取り誤差が大きく現われるためと考えられる。しかし、全体的には比較的良好な直線的傾向が現われていると云える。

一方、設定抵抗比 γ の変化に対しては、新プローブでは、 V_0, K の値が大きく変化し、いわゆるプローブの感度が良いことを示しているが、旧プローブでは同一の γ の値でも新プローブに比して V_0, K の値は小さくまた γ の値の変化に対しても V_0, K の変化は小さく現われ、すなわち、感度が鈍くなっていることがわかる。新旧プローブ いずれの場合も設定抵抗比 γ の増加に従って V_0, K の値は増加し、(6)式の傾向は一般満足していると考えよう。

つぎに、(7)式に従って $V^2/V_0^2 - 1$ の値を縦軸に $\sqrt{U}$ を横軸に取ってグラフを描くと、新プローブの場合は図-4、旧プローブの場合は図-5のようである。図-4の新プローブでは γ に対する V_0, K の変化が大きいしかし、 $K/V_0^2 = C$ の値ではよくまとまってくる。そして旧プローブでは逆に C の値にバラツキが見られる。

ii) リニア化の場合

流速 $U=0$ のときのノンリニア出力電圧 V_0 を0 γ にし、任意流速 U_H と設定しそのときのノンリニア電圧 V_H を10 γ に変換してその間を直線化した場合のリニア出力電圧 E と流速 U の関係は、まず(5)式より、

$$(V^2 - V_0^2) = K^2 U, \quad (V_H^2 - V_0^2) = K^2 U_H \quad \text{であるから}$$

$$E : 10\gamma = U : U_H = (V^2 - V_0^2) : (V_H^2 - V_0^2)$$

で直線化され、結局、リニア出力電圧 E (ボルト)は、

$$E = 10(V^2 - V_0^2) / (V_H^2 - V_0^2) \quad \text{----- (8)}$$

$$\text{または、} E = 10 U / U_H = 10 K U / (V_H^2 - V_0^2) \quad \text{----- (9)}$$

で表わされる。また、この場合の直線の勾配を α とすると、

$$\alpha = \frac{10 K}{(V_H^2 - V_0^2)^2} = \frac{10 \cdot (K/V_0^2)}{\{(V_H/V_0)^2 - 1\}^2} \quad \text{----- (10)}$$

で与えられる。したがって、勾配 α の値は K/V_0^2 が一定の場合であっても、 V_H の与え方によって種々の値をとる。

表-2

プローブの種類	設定抵抗比 γ	設定抵抗 R_0	水温 $^{\circ}\text{C}$	V_0 ボルト	V_0^2 ボルト	V_H (リニア出力10ボルト)	V_H/V_0	E-U直線の勾配 α	K/V_0^2	K
旧プローブ	1.020	4.68	11.1	1.47	2.16	4.5	3.06	0.167	1.08	2.33
	1.025	4.70	11.3	1.55	2.40	5.0	3.22	0.142	1.12	2.69
	1.030	4.72	"	1.68	2.82	5.3	3.15	0.125	1.00	2.82
新プローブ	1.020	4.89	11.7	1.67	2.79	5.5	3.30	0.119	1.08	3.01
	1.025	4.93	11.5	2.00	4.00	7.0	3.50	0.084	1.03	4.12

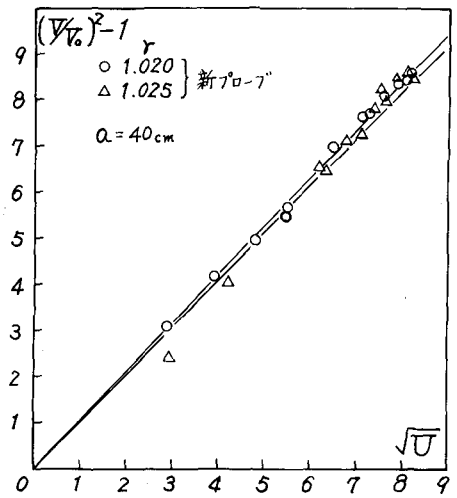


図-4 ノンリニア出力電圧の無次元表示

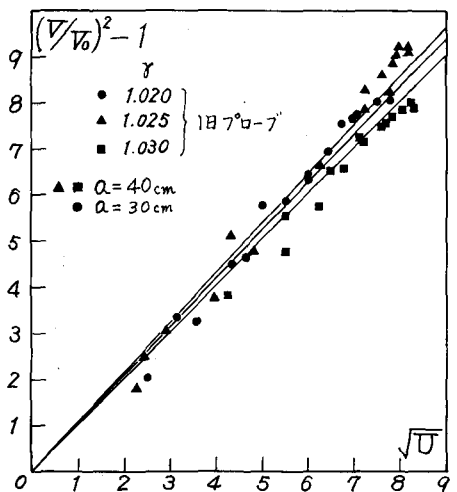


図-5 ノンリニア出力電圧の無次元表示

示すことになる。このことは、 U_H に対するノンリア電圧 V_H の値がメーター読みにしても、記録上からでも正確には得難いため多少余裕をとり大きく目的値を用いてリア化するためである。つぎに、i) のノンリアの場合の値を用いてリア化した後、種々の設定抵抗比の値に対して円盤の半径 $a \in 40, 30, 20 \text{ cm}$ に変へりリア電圧を測定し、図-2に示す $0 \sim 1$ 区間をわち、 $0 < a < a_H$ の範囲の測定値と流速値を各時間毎(0.1sec毎)に対応させて示したのが図-6である。リア出力電圧変化

はノンリアに比べて大きく、記録にも乱れがやゝ大きく現われるが平均的な値を読み取るにより、ノンリアの場合より精度の良い値が得られる。したがって図-6からも流速 U の小さい値まで良くリア化されているのが認められる。図中の各々の実線は測定値に対して平均的に挿入したもので、それぞれの直線の勾配 α を読み取ると表-2に

示すような値である。 α の値と共に α が変化するのには K/V_0^2 の値にも関係するが、やはり V_H の与え方によるものと考えられる。つぎに、勾配 α の値を用いて、 V_H/V_0 は表-2に示す値を与え、 K/V_0^2 、 K の値(10)式により逆算すると表-2に示す値を得た。これらの値をみると α の値が大きくな

る程やはり K は大きくなり、また K/V_0^2 の値は α の変化には特に関係なく、本来は一定値を与えるべきであるが値としてバラツキが見られる。これら K/V_0^2 、 K の値と V_0 との関係を図示すると図-7、図-8となる。さらに、 K の値を図-3の測定値と比較するため実線で挿入すると比較的よく一致する。また K/V_0^2 の値も同様の意味で図-4、5に実線で示した。

IV. おまけ

本実験では水温変化が $11.1 \sim 11.7^\circ \text{C}$ で僅か変化しているが、そのための影響が特に明確でなく、この程

参考文献

- 1) 加藤始・依野喜久雄・高松朱文 “水中の乱流測定のための Hot-film 流速計の特性” 港湾技術資料 No.157 Mar 1973
- 2) McQuivey, S.R. & Richardson, E.V. “Measurement of turbulence in water” proc. ASCE, Vol. 94 No. HY2, 411~430 1968
- 3) 河村三郎・保田稔 “熱線流速計による乱流測定法とその問題点” 土木学会誌 Vol. 59 33~37 1974. 11.

図-6 リア出力電圧と流速との関係

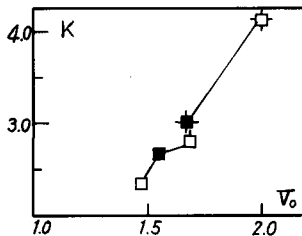
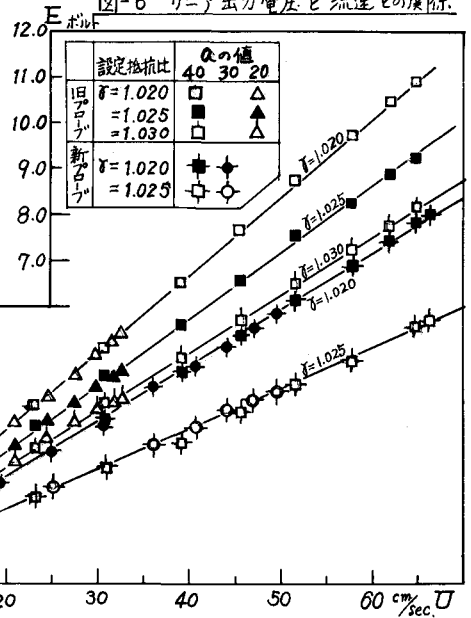


図-7

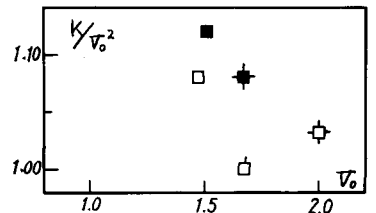


図-8

度の温度変化は差支えないと考えられる。また、旧プローブについては設定抵抗比 α の変化に対する V_0 、 K の値はかなり小さく変化するが、リア化した場合は直線性が得られ、流速値の変化に対してもよく追従している。なお、今回は円盤の回転周期が 3.882 sec 比較的長いためプローブの速度勾配が緩く、したがって、ノンリア、リアの場合ともよく追従するように思われる。最後に、本報告をまとめる上で、多大なご助力を賜りました本学の鯨目助手ならびに4年目学生田向、和田両君に厚く謝意を表します。