

水面および流速測定器の一試作

九州大学助教授 上 田 年 比 古
同 〇 崎 山 正 常

1. 前 が き

従来、各方面で用いられてきた水面、および流速の測定器には周知のとおり、いろいろのものがあるが、ここでは、簡単に作製でき、精度もよく、価格も比較的安くできる水位計と流速計を試作し、これらについて報告する。水位計はストレンゲージを使用した浮子式のものであり、流速計はピトー管中に2本の白金抵抗線を入れた

もので、時間的に変動する流速を連続的に求めようとしたものである。

2. 浮子式水位計

ストレンゲージを用いた水位計には、現在市販されているプレッシャーヘッド、Uゲージの応用によるものなどがあるが、ここにのべる水位計は原理的にはそれらに類するもので、その略図を図-1に示している。

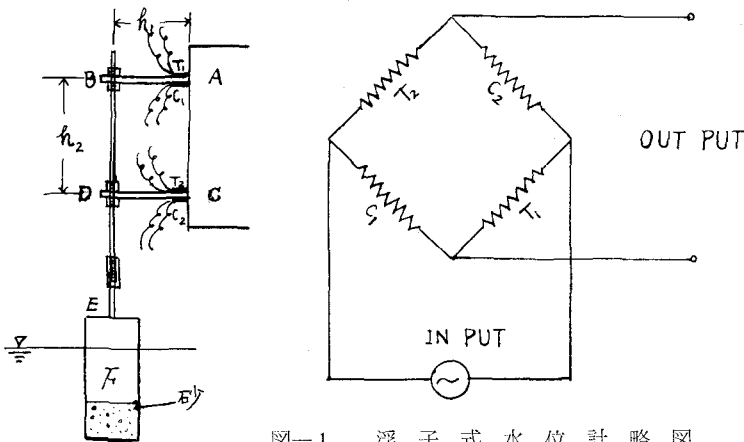


図-1 浮子式水位計略図

ここに、
 T_1, T_2, C_1, C_2 はストレンゲージ (120Ω)
部材 $\overline{AB}, \overline{CD}$ は弾性板 (アルミニウム板)
 $\overline{BE}$ は鋼棒で、E部をネジにより伸縮できるようにしている。

Fは浮子 (円筒管、底部砂填充) A, Cは固定端, B, Dは可動節点である。

次に、このような浮子の運動を調べてみよう。

浮子に外力Pが作用したときの変位yは

$$y = P/k \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ただし } k = 6(6 + \alpha) E_1 I_1 / (3 + 2\alpha) h_1^3 \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha = E_1 I_1 h_2 / E_2 I_2 h_1 \dots \dots \dots (3)$$

ここにkはABDC構の剛比, E, I, hは $\overline{AB}, \overline{CD}, \overline{BD}$ 部材の弾性係数, 断面二次モーメント, 部材長であり、添字の1は部材 $\overline{AB}, \overline{CD}$, 2は部材 $\overline{BD}$ に対するもの

である。いま水位が周期的に変化する場合の浮子の任意時刻tにおける変位をyとし、質量をmとすれば運動の式は

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + k' \frac{dy}{dt} + ky = P \sin 2\pi n_p t \dots \dots \dots (4)$$

左辺の第一項は慣性力, 第二項は水の粘性にもとづく抵抗力, 第三項は図-1の $\overline{AB}, \overline{CD}$ の変位に対する抵抗力であり、右辺は周期的に変化する水面変動にもとづく外力である。 n_p は水位変動の振動数である。(4)式を解いて $t=0$ で $y=0, \frac{dy}{dt}=0$ の条件を与えれば

$$y = ce^{-bt} \cos(\omega t + \epsilon) + \frac{AP}{m} \sin(2\pi n_p t - \delta) \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $b = k'/2m$

$$\omega = \sqrt{k/m - k'^2/4m^2}$$

固有周期 $T = 2\pi / \sqrt{k/m - k'^2/4m^2}$

$$\text{固有振動数 } N = \frac{1}{T} = \sqrt{k/m - k'^2/4m^2}/2\pi$$

$$A = 1/4\pi^2 \sqrt{(n^2 - n_p^2)^2 + k'^2 n_p^2 / 4\pi^2 m^2} \quad (6)$$

$$\delta = \tan^{-1} \{ (2\pi n_p k') / \{ k(1 - \frac{n_p^2}{n^2}) \} \}$$

$$C = \{ A \cdot P (2\pi n_p) \} / (m \cdot \omega)$$

$$\epsilon = -\tan^{-1} \{ \frac{2\pi n_p}{\omega} \cot \delta + \frac{b}{\omega} \}$$

$$\text{浮子の減衰率 } f = e^{-\frac{k'T}{2m}}$$

強制振動の最大振幅は(5)式より

$$A \cdot P/m = \frac{P}{k} \cdot Z \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{ただし, } Z = 1/\sqrt{(1 - \frac{n_p^2}{n^2})^2 + \frac{k'^2}{km} (\frac{n_p}{n})^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$n = \sqrt{k/m^2 2\pi} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに Z は強制振動における最大振幅 AP/m の静的な外力による変位 P/k に対する倍率を示している。次に試作した浮子の各種類に対する実測値と計算値を表-1, 表-2 に示している。

表-1 測定に用いた浮子

浮子	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	E ₁ (kg/cm ²)	E ₂ (kg/cm ²)	I ₁ (cm ⁴)	I ₂ (cm ⁴)	m (kg・S ² /cm)	α	k (kg/cm)
A	6.20	10.0	7.2×10 ⁵	2.1×10 ⁶	1.67×10 ⁻⁴	6.35×10 ⁻³	3.12×10 ⁻⁴	1.45×10 ⁻²	6.01
B	5.60	"	"	"	"	"	3.50 "	1.61 "	8.15
C	4.64	"	"	"	"	"	3.48 "	1.94 "	14.30
D	4.64	"	"	"	"	"	3.38 "	1.94 "	14.50
E	7.70	"	"	8.0×10 ⁵	1.78×10 ⁻⁴	"	7.12 "	3.27 "	3.33

*浮子の直径: A, B, C, Dは5.2cm, Eは6.6cm, 高さ: A, B, C, Dは13cm, Eは25cm

表-2 自由振動測定値とその計算値

浮子	(1)		(2)		(3)**		(4)**
	実測振動数 (N)		実測減衰率 (f)		k' (kg・S/cm)		計算固有振動数 (N)
	空気中	水中	空気中	水中	空気中	水中	$N = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{k'^2}{4m^2}}/2\pi$
A	24.80	23.20	0.906	0.900	1.51×10 ⁻³	1.52×10 ⁻³	22.1
B	26.30	25.00	0.935	0.918	1.23 "	1.49 "	24.4
C	33.70	31.80	0.956	0.940	1.03 "	1.55 "	32.2
D	34.00	32.40	0.960	0.945	0.924 "	1.23 "	33.1
E	11.40	10.65	0.950	0.939	0.823 "	0.924 "	11.0

* (3) (6)式の f より逆算したもの。 (4)** (6)式の N による。

後述するように、浮子作製にあたっては、固有振動数を考慮する必要があるが、表-2 に示す固有振動数の実測値と計算値はほぼ一致しているので、(6)式によって計算できることがわかる。また(6)式中の $\frac{k'^2}{4m^2}$ は、表-2 からわかるように、 $\frac{k}{m}$ に比して無視できる程度に小さい値であるから、一般には省略して差支えない。次に浮子の固有振動数を N ($\equiv n$)、現象の振動数を n_p 、計器の最高応動振動数を n_m として、計器が現象に追従する範囲内、すなわち $n_m > n_p$ の場合について考察してみよう。

(8)式により k'^2/km を与えて、 $Z \sim \frac{n_p}{n}$ の図をかけば、 Z は $n_p/n \leq \frac{1}{3}$ ではほとんど1で $\frac{1}{3} < \frac{n_p}{n} < 1$ で急激に大

きくなり、共振点 $\frac{n_p}{n} = 1$ で ∞ に近くなり、 $\frac{n_p}{n} > 1$ で急激に減少し0に漸近する。

したがって次の場合について検討する。

$$(a) \quad n_p/n \leq \frac{1}{3}$$

$$(b) \quad \frac{1}{3} < n_p/n < 1$$

$$(c) \quad \frac{n_p}{n} = 1$$

$$(d) \quad 1 < \frac{n_p}{n}$$

(a)の場合は n_p が多少変化しても、 Z は変化せず、したがって計器として安定な状態であるから、計器として利用される範囲といえる。この場合、 $n_p < n_m < n$ では浮子の固有振動が記録にあらわれず、 $n_p < n < n_m$ では

浮子の固有振動が記録にわずかにあらわれる。したがって前者が好ましいといえる。以上のように n が大きいことが必要であるが、これは(6)式の N 式より k/m を大きくすることである。しかしこの場合 k を余りに大きくすると歪みが小さくなり過ぎて、ストレングスの出力が不足する。また m をあまりに小さくすると、 k がそれ程大きくない場合に対して、風などの外部的要素の影響を受けやすく浮子自体が不安定となる。したがって、これらの点で m および k におのずから制約を生ずる。

次に共振点(c)は不可である。また(b), (d)では n_p のわずかな変化でも Z が大きく変化し記録上の値から実際の値を求めることは不可能となる。なお $\frac{n_p}{n} \gg 1$ の場合は、 Z は小さい値で、ほぼ一定となり n_p の変化に対しては Z は変化しないのでこの点ではよいが、 $\frac{k}{m}$ が小さいこと、すなわち、きわめて可撓性であって、測定器としては不可である。さらにまた、現象と記録の位相差を示す(6)式の δ 式から考えても $n_p/n \leq \frac{1}{3}$ では $\delta \approx 0$ で、 $n_p/n > \frac{1}{3}$ になると δ は次第に大きくなり、 $n_p/n = 1$ で、 $\delta = 90^\circ$ 、 $n_p/n > 1$ では δ はさらに大きくなる。

以上によって一般の計器と同様、 $\frac{n_p}{n} \leq \frac{1}{3}$ が本水面測定器として用いられる条件といえる。たとえば表一の浮子Aでは、水面変化 0 ~ 12 cm に対して、水面振動数 7 までは測定できることがわかる。

次に浮子Aについて行なった水位と歪計の読み値との関係を図-2に例示する。これによれば浮子Aは歪計の読みと水面変化が、かなりの範囲にわたって、直線性を示している。

この点については他の浮子についても同様な結果がえられた。したがって、本水位計でオシログラフに記録させた場合、オシログラフは歪計の読みに比例して記録する関係上、補正を必要としない。このことは水位計として有用なものといえよう。

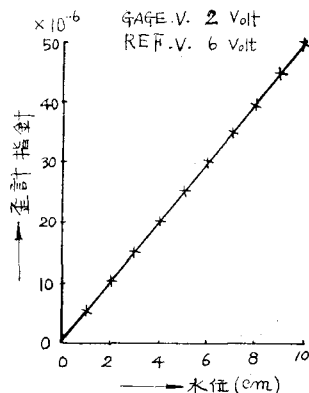


図-2 水位と歪計読み値

本水位計によって測定した現象のデータ等については講演時にのべる。

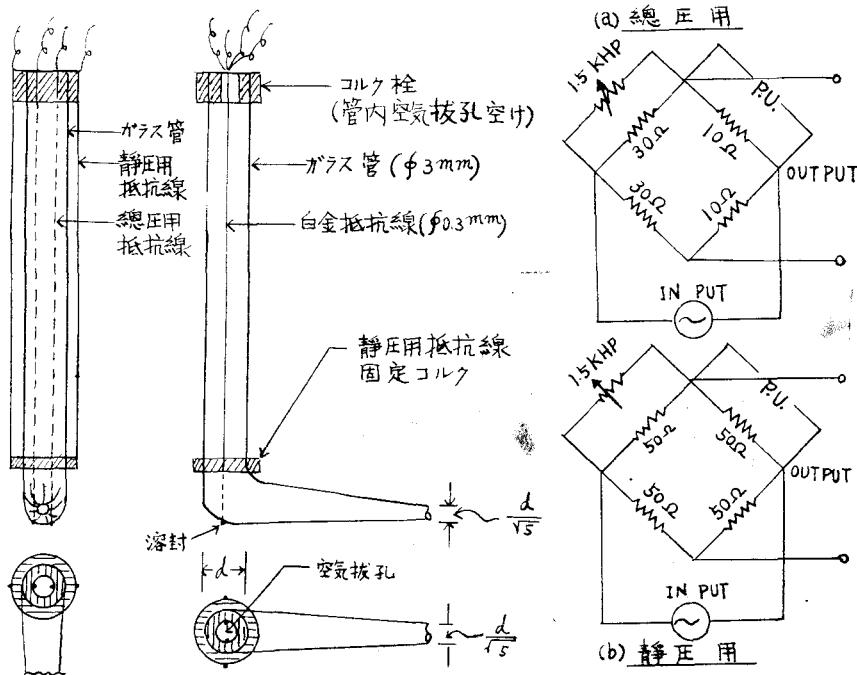


図-3 抵抗線式ピート管略図

3. 抵抗線式ピトー管

従来、白金抵抗線を用いた、いわゆる抵抗線式水位計は多く使用されているが、ここにのべる抵抗線式ピトー管は、白金抵抗線をピトー管中に挿入し、歪計によってピトー管中の水面変化を連続的にとらえて、時間的に変化する流速を求めようと試みたものである。

そのためにピトー管の応動時間を極力短縮するよう試作にあたって考慮した。その略図を図一3に示している。

いまピトー管の入口（先端）の断面積を a 、管柱の断面積を A 、流速 V による水面差を h とし、 $V = \sqrt{2gh}$ によって dt 時間に dh の管柱の水面上昇をなすものとするば、 $Vadt = Adh$ である。

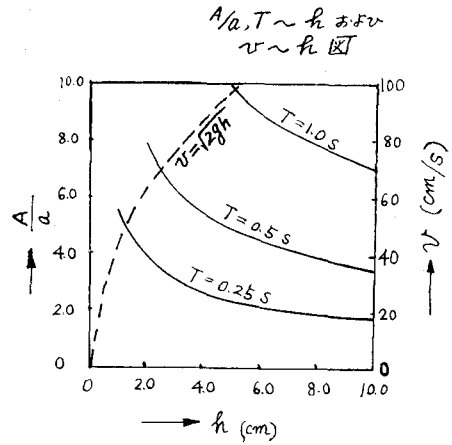
これより、ピトー管中を水位が 0 から h まで上昇する時間 T は

$$T = \frac{\sqrt{2}}{a} \frac{A}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{h}{g}} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、瞬間の流速変化をとらえるためには応動時間 T を小さくする必要があるから A/a 断面比は小さい程よい。

しかし断面比が余り小さいと、水面の動揺が敏感に伝わり、ピトー管柱の水面がはげしく動揺し、測定が困難となる。

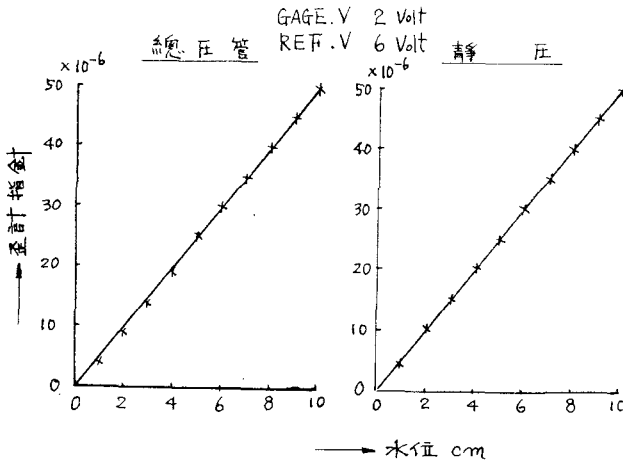
ここでは図一3に示すように流速 1 m/s が 0.5 sec 以内に応動するように断面比 A/a を 5 程度とした。図一4の実線は(7)式を図示したもので、点線は $V = \sqrt{2gh}$ の曲線である。これによれば、例えばピトー管中の水面の $h = 4\text{ cm}$ の変化、すなわち 88 cm/s の流速変化を 0.25 sec で応動させるには、断面比 A/a は 2.6 が必要であることを示している。



図一4 A/a 、 $T \sim h$ および $V \sim h$ 図

次に、総圧と静圧について測定した水位と歪計の読みとの関係を図一5に示している。なお、この関係はきわめて短い応動時間内で生じた。これによると、総圧、静圧線とも水位と指示計読みの関係はほとんど直線となしている。

また、抵抗線式水位計は多素子の歪計など同一電源で使用する場合、その設置距離が近いと水位計間に誘電、流電が起り、ある点の水面変化が他のピックアップに影響する。このため少なくとも 50 cm 以上離して使用する必要がある。しかし、ピトー管では、管体がガラスなどの絶縁物である場合、総圧、静圧線間の誘電、流電は全く認められない利点がある。また歪計への入力回路は図一3に示すようにピトー管中においては低抵抗 (10Ω 程度)、管外においては比較的高抵抗 (50Ω 程度) でも高精度の直線性を示した。



図一5 水位と歪計読み値

以上によって、抵抗線式ピトー管についてその概略をのべたが、これによって測定した瞬間流速の実測データ等については講演時にのべる。

なお本研究は文部省科学研究費（各個研究および試験研究）の援助のもとに行なわれたもので、ここに記して謝意を表する。